
DIPLOMARBEIT

Herr Ing.
Mario Schachermayr

**Entwicklung und Erprobung
eines Elektromotorrades**

Mittweida, 2017

DIPLOMARBEIT

**Entwicklung und Erprobung
eines Elektromotorrades**

Autor:
Herr Ing.

Mario Schachermayr

Studiengang:
Maschinenbau

Seminargruppe:
KM08w2MVA

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Winkler

Einreichung:
Mittweida, 2017

Verteidigung/Bewertung:

- -

Bibliografische Beschreibung:

Ing. Schachermayr Mario:

Entwicklung und Erprobung eines Elektromotorrades - 2016. - Seitenzahl der Verzeichnisse S.13, Seitenzahl des Inhalts S.83, Seitenzahl der Anhänge S 14, Altensam, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Diplomarbeit, 2017

Referat:

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Bau eines Elektromotorrades. Von der Auslegung des Antriebs über die Auswahl und der Restaurierung eines gebrauchten Motorradchassis. Gleichzeitig wurden die benötigten Teile ausgewählt und bestellt. Mit Hilfe der Datenblätter und Abmessungen der Bauteile wurden die benötigten Halterungen so konstruiert, dass sie an den vorhandenen Aufnahmepunkten im Chassis befestigt werden konnten. Anschließend wurden die Komponenten des Elektroantriebs außerhalb des Motorrades getestet. Im Anschluss wurde der Elektroantrieb eingebaut und verkabelt. Danach wurde ein Testkonzept erstellt. Nach welchem anschließend das Motorrad getestet wurde.

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Formelverzeichnis	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Zugang zum Thema	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 E-Motorräder im Straßen- und Rennbetrieb.....	4
1.3.1 Leistungsfähigkeit von Elektromotorrädern im Motorsport	5
1.3.2 Straßenzugelassene Elektromotorräder im deutschsprachigen Raum.....	7
1.4 Methodik	10
2 Auslegung des elektrischen Antriebs.....	13
2.1 Grundlegende Auslegung der Motorleistung und der Akkukapazität.....	14
2.1.1 Berechnung der Übersetzung.....	14
2.1.2 Berechnung der Fahrwiderstände	15
2.1.2.1 Berechnung des Rollwiderstandes	16
2.1.2.2 Berechnung des Luftwiderstandes	17
2.1.2.3 Berechnung des Steigungswiderstandes.....	17
2.1.2.4 Berechnung des gesamten stationären Fahrwiderstandes	18
2.1.2.5 Berechnung des translatorischen Beschleunigungswiderstandes.....	18
2.1.3 Berechnung des Motorleistungsbedarfs	19
2.1.3.1 Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände.....	19
2.1.3.2 Benötigte Beschleunigungsleistung	20
2.1.3.3 Bestimmung der Nennleistung und des Nenndrehmoments	20
2.1.4 Auslegung des Energiespeichers	21
2.1.4.1 Bestimmung der benötigten Kapazität.....	21
2.1.4.2 Berechnung des Maximalstroms	22
2.1.5 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen	22
2.1.5.1 Ergebnisse aus der Berechnung „Grundlegende Antriebsauslegung mit Annahmen“	22

2.1.5.2	Ergebnisse aus der Berechnung „Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl“	22
2.2	<i>Benötigte Komponenten für den Primärtrieb</i>	24
2.2.1	Auswahl des Zellentyps für die Traktionsbatterie	24
2.2.2	Auswahl des Elektromotors	28
2.2.3	Auswahl des Motorcontrollers	32
2.3	<i>Auswahl der zum Betrieb benötigten Sekundärkomponenten</i>	38
2.3.1	Auswahl des Regelorgans.....	38
2.3.2	Auswahl des Batterie-Management-Systems	39
3	Chassis und Verkleidung	41
3.1	<i>Auswahl des geeigneten Spendermotorrades</i>	41
3.1.1	Das zulässige Gesamtgewicht	41
3.1.2	Motorrad mit Vollverkleidung	41
3.1.3	Die Bauart des Rahmens	42
3.1.4	Der Preis des Spendermotorrades	42
3.1.5	Der Allgemeinzustand	42
3.2	<i>Kauf des Motorrades</i>	43
3.3	<i>Bestandsaufnahme am Chassis, der Beleuchtung und der Verkleidung</i>	44
3.3.1	Ausbau des Verbrennungsmotors und der zukünftig unnötigen Teile	44
3.3.2	Überprüfung der Bremsanlage, des Fahrwerks, der einzelnen Lager und des Rahmens.....	45
3.4	<i>Instandsetzung der defekten Teile und Aufbereiten der Optik</i>	45
3.5	<i>Das Chassis soweit fertig stellen, sodass es die §57A Überprüfung besteht.</i>	47
3.6	<i>Bestimmen des Designs durch neue Farbgebung</i>	47
4	Konstruktion aller benötigten Halterungen	49
4.1	<i>Vorplanung der Positionierung aller Komponenten im Rahmen</i>	49
4.2	<i>Konstruktion und Bau des Batterieracks</i>	50
4.2.1	Auswahl der Profile und Schrauben	51
4.2.2	Konstruktion des Batterierahmens mit CAD	52
4.3	<i>Konstruktion und Fertigung der Motorplatte</i>	53
4.3.1	Konstruktion der vorläufigen Motorplatte mit CAD Unterstützung	53
4.3.2	Endgültige Konstruktion der Motorplatte mit CAD und FEM Unterstützung ...	54
4.3.3	Fertigung der Motorplatte	56
4.4	<i>Bau der Halterung des Motorcontrollers, des Hauptrelais und des BMS</i>	57
4.5	<i>Auswahl der Getriebekomponenten</i>	58
5	Zusammen- und Einbau aller Komponenten.....	61

5.1	<i>Überprüfung des Zusammenspiels der E-Komponenten</i>	61
5.1.1	Vorbereitung der Zellen	61
5.1.2	Vorbereitung des Motors	62
5.1.3	Vorbereiten des Controllers und des BMS.....	62
5.1.4	Durchführen des Werkbanktests	64
5.2	<i>Einbau der neuen Komponenten in den Motorradrahmen</i>	65
5.2.1	Einbau des Elektromotors	65
5.2.2	Bestückung und Einbau des Batterieracks	65
5.2.2.1	Schritt 1: Einbau der unteren vier Zellen in den Hauptrahmen.....	65
5.2.2.2	Schritt 2: Einbau der vier mittleren Zellen des Hauptrahmens	66
5.2.2.3	Schritt 3: Einbau der fünf Zellen des Oberteils.....	66
5.2.2.4	Schritt 4: Einbau des Batterierack-Hauptrahmens in das Motorrad.....	67
5.2.2.5	Schritt 5: Montage der Rahmenerweiterung und Platzieren der restlichen Zellen	68
5.2.3	Einbau des Motorcontrollers und des BMS.....	68
5.3	<i>Konfektionierung der benötigten Kabelbäume</i>	69
5.3.1	Anschluss des Motorcontrollers am Bord Netz	70
5.3.2	Anschluss des Elektromotors am Motorcontroller	70
5.3.3	Verbindung zwischen Motorcontroller und Traktionsbatterie.....	70
5.3.4	Anschluss des BMS am Bord Netz und Verkabelung aller zum System gehörigen Bauteile	71
5.3.5	Serienschaltung der Zellen.....	72
5.3.6	Anschluss des Ladegerätes	72
6	Erstellen eines Testkonzepts und Fahrtests	74
6.1	<i>Aufbau des Testkonzepts</i>	74
6.2	<i>Festlegen des Umfangs der einzelnen Tests</i>	75
6.2.1	Test 1: Funktionsprüfung aller benötigten Systeme und Handlingverhalten im Stand und bei langsamer Fahrt	75
6.2.2	Test 2: Fahrverhalten des Fahrzeugs bei größerer Beschleunigung und gewöhn an das Handling	76
6.2.3	Test 3: Fahrt im Stadtgebiet und auf der Landstraße, Einstellen der Übersetzung.....	77
6.2.4	Test 4: Überprüfung der Reichweite	77
6.3	<i>Auswertung der Testergebnisse</i>	78
6.3.1	Zusammenfassung des 1. Tests.....	78
6.3.2	Zusammenfassung des 2. Tests.....	78
6.3.3	Zusammenfassung des 3. Tests.....	79
6.3.4	Zusammenfassung des 4. Tests.....	79
7	Fazit	82

7.1	<i>Zusammenfassende Darstellung des Projekts</i>	82
7.2	<i>Ausblick</i>	83
Literatur		85
Anlagen		91
Anlagen, Teil 1: „Antriebsauslegung mit Annahmen“		1
Anlagen, Teil 2: Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl		7
Danksagung		15
Selbstständigkeitserklärung		17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Durchschnittliche Tagesweglänge je Person in [km] nach Bundesländern und Geschlecht	2
Abbildung 2: Strecke Wohnort - Bahnhofparkplatz	3
Abbildung 3: Strecke Altensam 41 - Thomasroith.....	4
Abbildung 4: Projektablaufplan.....	11
Abbildung 5: Erstes E-Bike aus dem Jahre 1895 von Odgen Bolton, USA	13
Abbildung 6: Berechnung Raddurchmesser	15
Abbildung 7: Fahrwiderstände.....	16
Abbildung 8: Vergleich von Leistungs- und Energiedichte einiger Energiespeicher	26
Abbildung 9: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle.....	28
Abbildung 10: Magnetfeld eines langen stromdurchflossenen Stromfadens	29
Abbildung 11: Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule	29
Abbildung 12: Überlagerung zweier elektromagnetischer Felder	30
Abbildung 13: Drehung eines Leiterstrangs.....	30
Abbildung 14: Funktionsschema des bürstenlosen Gleichstrommotors mit Schaltbild und Drehzahl/Drehmoment-Charakteristik.....	31
Abbildung 15: Stromlaufplan zum Aufladen des Akkus mittels des Bremsstromes	33
Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung von Gleichstrom- und Drehstromsteller. Beide Steuereinheiten sind Teil des Controllers.	34
Abbildung 17: Prinzipschaltbild eines Gleichstrom-Stellers (Stromrichter)	35
Abbildung 18: Spannungsverlauf Gleichstrom-Steller.....	35

Abbildung 19: Schema eines Drehstrommotors	37
Abbildung 20: Anschlussschema Controller	38
Abbildung 21: Schaltschema Gamber BMS	40
Abbildung 22: Yamaha FZR 500 nach dem Kauf	43
Abbildung 23: rollendes Chassis	44
Abbildung 24: pulverbeschichtetes Chassis	46
Abbildung 25: erste Variante der Zellenplatzierung	49
Abbildung 26: vorläufige Motorhalterung	50
Abbildung 27: Batterierahmen in der CAD-Planung.....	50
Abbildung 28: Bestücktes Batterierack verbaut im Chassis.....	51
Abbildung 29: Provisorische Motorplatte eingebaut im Rahmen.....	54
Abbildung 30: maximale Verformung der Motorplatte.....	55
Abbildung 31: maximale Vergleichsspannung	55
Abbildung 32: Detailansicht der Bohrung mit der höchsten Belastung.....	56
Abbildung 33: Positionierung Motorplatte mit Kettenrad	56
Abbildung 34: Controllerplatte mit Hauptrelais und BMS	57
Abbildung 35: Zellenverschaltung	63
Abbildung 36: Die ersten vier Zellen im verbauten Zustand.....	66
Abbildung 37: Mit Zellen befüllter Boden und Mittelteil (ohne M8 Schrauben)	66
Abbildung 38: Halbfertiger Batterierahmen.....	67
Abbildung 39: Mit Zellen befüllter Hauptrahmen.....	67
Abbildung 40: Montierte Traktionsbatterie	68
Abbildung 41: Konfektionierter Kabelstrang für vier Zellen	71

Abbildung 42: Motorrad vor der ersten Testfahrt	75
Abbildung 43: aufgezeichnete Strecke Langstreckentest	80
Abbildung 44: Ausschnitt der Aufgezeichneten Daten des 2. Teilabschnittes	80
Abbildung 45: Höhenprofil 2. Teilabschnitt	81
Abbildung 46: Motorrad auf Anhänger nach dem Langstreckentest.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Elektromotorradmodelle im deutschsprachigen Raum	9
Tabelle 2: Rollreibungkoeffizienten	17
Tabelle 3: Spannungs-Drehzahl-Tabelle	23
Tabelle 4: Kenndaten von Akkus (Auswahl)	26
Tabelle 5: Zündschema zum Ansteuern der Leistungshalbleiter T1 bis T6.....	37
Tabelle 6: Kettenbezeichnungen und Abmessungen.....	58
Tabelle 7: Ausschnitt Tabelle "Übertragbare Momente mit Taper Spannbuchsen- Verbindungen"	59

Abkürzungsverzeichnis

S.	Seite(n)
Kfz	Kraftfahrzeug
[km]	Kilometer
bmvit	Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie
[km/h]	Kilometer pro Stunde
ÖAMTC	Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club
TTXGP	Time Trials Extreme Grand Prix
SES	Société Européenne des Satellites
TT Zero	Time Trials Zero Emission
[min]	Minuten
[s]	Sekunden
ca.	circa
[PS]	Pferdestärke
FIM	Fédération Internationale de Motocyclisme
PPIHC	Pikes Peak International Hill Climb
KERS	kinetic energy recovery system
[kW]	Kilowatt
SI-Einheit	Système international d'unités
n	Drehzahl
[min⁻¹]	Umdrehungen pro Minute
b	Breite
[mm]	Milimeter
h	Höhe
d	Durchmesser
v	Geschwindigkeit

$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	Meter pro Sekunde
u	Umfang
[m]	Meter
i	Übersetzung
F	Kraft
[N]	Newton
m	Masse
g	Erdbeschleunigung
$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$	Meter pro Sekundenquadrat
μ_r	Rollwiderstandskoeffizient
ρ	Dichte
$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Kilogramm pro Kubikmeter
A	Fläche
[m²]	Quadratmeter
sin	Sinus
α	Alpha
tan	Tangens
q	Steigung in Prozent
a	Beschleunigung
Δ	Delta
η	Wirkungsgrad
P	Leistung
[W]	Watt
M	Drehmoment
[Nm]	Newtonmeter
[sec⁻¹]	Umdrehungen pro Sekunde
U	Spannung
[V]	Volt

I	elektrischer Strom
[A]	Ampere
s	Weg
K	Kapazität
[As]	Amperesekunde
W	mechanische Arbeit
[Ws]	Wattsekunde
E	elektrische Energie
$[\frac{Wh}{kg}]$	Wattstunde pro Kilogramm
$[\frac{Wh}{dm^3}]$	Wattstunde pro Kubikdezimeter
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
Li-Ion	Lithium-Ionen
Li-Po	Lithium-Polymer
LiFePO₄	Lithium-Eisen_Phosphat
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
BMS	Battery Management System
[Ah]	Amperestunde
C	Entladestrom
BLDC	brushless direct current (bürstenloser Gleichstrommotor)
z. Bsp	zum Beispiel
DC	direct current (Gleichstrom)
MOSFET	Metall-Oxid-Schicht-Feld-Effekt-Transistor
t	Zeit
T	Periodendauer
[kΩ]	Kiloohm

CAD	(computer-aided design) rechnergestützter Entwurf
3D	dreidimensional
2D	zweidimensional
FEM	Finite Elemente Methode
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
IL	Initialladung
LED	Licht emittierende Diode
PMMA	Polymethylmethacrylat (Plexiglas)
[ccm]	Kubikzentimeter

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Raddurchmessers.....	14
Formel 2: Berechnung der Übersetzung.....	15
Formel 3: Rollwiderstand.....	16
Formel 4: Luftwiderstand.....	17
Formel 5: Steigungswiderstand	17
Formel 6: vereinfachter Steigungswiderstand.....	18
Formel 7: gesamter stationärer Fahrwiderstand	18
Formel 8: translatorische Beschleunigung	18
Formel 9: translatorischer Beschleunigungswiderstand.....	18
Formel 10: Ermittlung des angenommenen Gesamtwirkungsgrades.....	19
Formel 11: Motorleistung zur Überwindung der Fahrwiderstände.....	19
Formel 12: Motordrehmoment zur Überwindung der Fahrwiderstände	19
Formel 13: Beschleunigungsleistung.....	20
Formel 14: Beschleunigungsmoment	20
Formel 15: benötigte Nennmotorleistung.....	20
Formel 16: benötigtes Nennmotordrehmoment	20
Formel 17: Gegenüberstellung mechanische Arbeit - elektrische Energie	21
Formel 18: Kapazität	21
Formel 19: Berechnung der benötigten Kapazität.....	21
Formel 20: elektrische Leistung.....	22

Formel 21: Berechnung des Maximalstromes	22
Formel 22: mögliche Reichweite	24
Formel 23: Ausgangsspannung am Gleichstromsteller	35
Formel 24: Eingangsstrom am Gleichstromsteller	36
Formel 25: Verlustfreier Transformator.....	36

1 Einleitung

1.1 Zugang zum Thema

Nachdem ich einen Internetartikel über den Bau eines Elektromotorrades für das „Zero-TT-Rennen“ auf der Isle of Man gelesen habe, begann ich mich für das Thema „Elektromobilität“ zu interessieren. Da zum Zeitpunkt der Entscheidung für ein Projektthema seitens meiner Firma keine Möglichkeit bestand eine Diplomarbeit zu schreiben, entschied ich mich für den Bau eines straßenzugelassenen Elektromotorrades. Zu diesem Zweck sollte ein vollverkleidetes Youngtimer-Motorrad als Basis dienen.

1.2 Problemstellung

Heutzutage ist Elektromobilität ein viel diskutiertes Thema, einige behaupten sie wäre die Zukunft der Mobilität, andere bestreiten diese Meinung und wieder andere warten ab, wie sich die Thematik weiterentwickelt. Zum heutigen Zeitpunkt sind Hybridfahrzeuge und Kfz mit reiner elektrischer Traktion noch relativ kostspielig, wodurch viele Privatis bei einer Fahrzeugneuanschaffung doch eher zu konventionellen Antrieben tendieren.

Gründe für die Entscheidung gegen die Elektromobilität sind meistens:

- Relativ hohe Fahrzeugkosten
- Geringe Reichweite
- Nicht autobahnfähig, da hohe Geschwindigkeiten die Reichweite rapide senken
- Schlecht ausgebaute Infrastruktur (Netz von Ladestationen)
- Hohe Umweltbelastung bei der Produktion und der Entsorgung der elektrochemischen Zellen

Bei den oben angeführten Gründen ist die Reichweite für die meisten potentiellen Fahrzeugkäufer das ausschlaggebende Kriterium beim Fahrzeugkauf, verbunden mit der schlecht ausgebauten Infrastruktur.

Betrachtet man aber die Wegstrecken, die von den meisten Fahrzeugnutzern täglich bewältigt werden müssen, stellt man fest, dass pro Person täglich in etwa maximal 100 km zurückgelegt werden. Großteils ist die Distanz viel geringer. Wobei diese Strecken nur am Weg von und zur Arbeitsstätte und / oder für tägliche Erledigungen wie Einkäufe zustande kommen.

Nach einer Statistik des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, kurz bmvit, aus dem Jahr 2011, lag 1995 der österreichweite Durchschnitt der Tagesweglänge je Person in [km] bei Männern bei 37 km und bei Frauen bei 20,6 km.¹

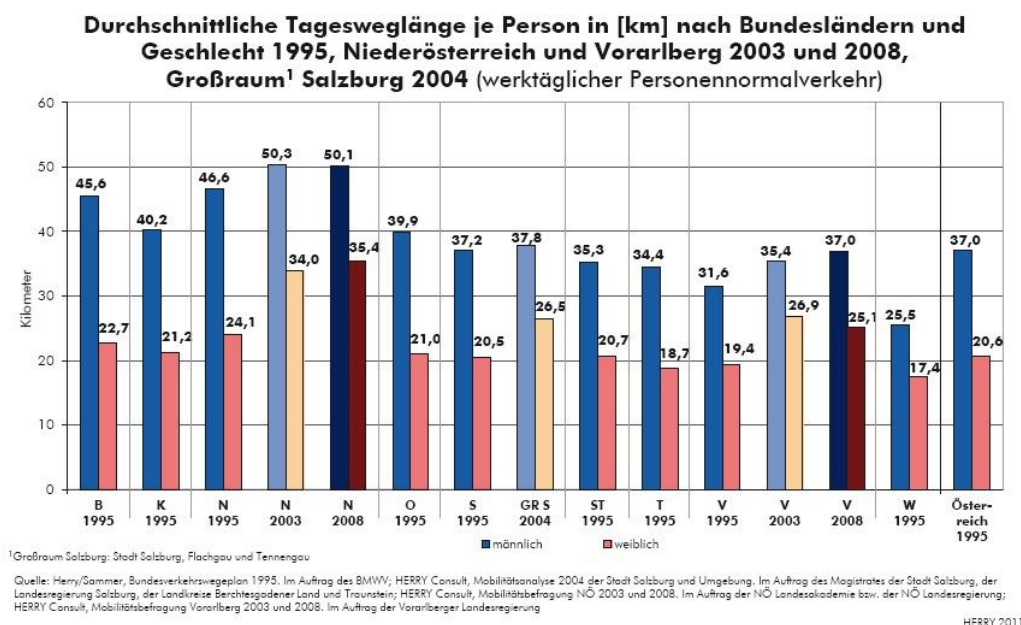


Abbildung 1: Durchschnittliche Tagesweglänge je Person in [km] nach Bundesländern und Geschlecht²

Diese Angaben sprechen schon eher für einen Elektroantrieb, da diese Distanzen von beinahe allen, am Markt erhältlichen, rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen, bewältigt werden können. Somit kommt auch der Einwand mit dem schlecht ausgebautem Netz der Ladestationen weniger zum Tragen, da auf diesen Strecken keine Ladestation benötigt wird, sondern das Fahrzeug immer zu Hause geladen werden kann.

¹ Vgl. Herry, 2011, S.105, (Stand: 23.03.2013)

² Ebd.

Ein weiteres Argument für den Elektroantrieb ist die Durchschnittsgeschwindigkeit im Berufsverkehr. Diese liegt bei all diesen Wegen meistens unter $100 \frac{km}{h}$, dies oftmals sogar auf der Autobahn. In urbanen Gebieten kommt noch der Stop-and-go-Verkehr dazu, welcher die Durchschnittsgeschwindigkeit wiederum senkt und gleichzeitig den durchschnittlichen Verbrauch hebt.

Diese Gegenargumente waren ausschlaggebend, darüber nachzudenken, ein bereits straßenzugelassenes Fahrzeug mit einem Elektroantrieb auszurüsten, um selbst feststellen zu können, wie alltagstauglich ein elektrisch betriebenes Fahrzeug ist.

Grundsätzlich sollte das Fahrzeug zum Pendeln benutzt werden. Die täglich zu bewältigende Strecke führt von zu Hause, Altensam 41, 4800 Pühret, zum Bahnhofparkplatz nach Attnang-Puchheim und wieder zurück. Dies entspricht hin und zurück rund 10 km . Zusätzlich sollte es möglich sein, mit einer Akkuladung auch meine Eltern oder Freunde in Thomasroith besuchen zu können, wofür zusätzlich etwa 25 km notwendig wären. In Summe würde die mit einer Ladung zu bewältigende Strecke bei 35 km liegen. Dabei sollten diese Wege mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h zurückgelegt werden können.

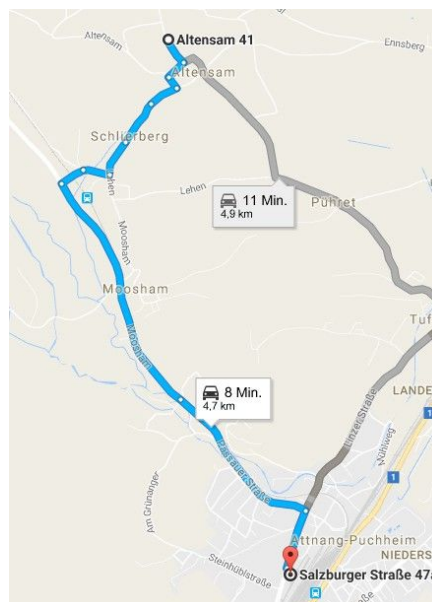


Abbildung 2: Strecke Wohnort - Bahnhofparkplatz³

³ Vgl. <https://www.google.at/maps>, (Stand: 15.09.2016)

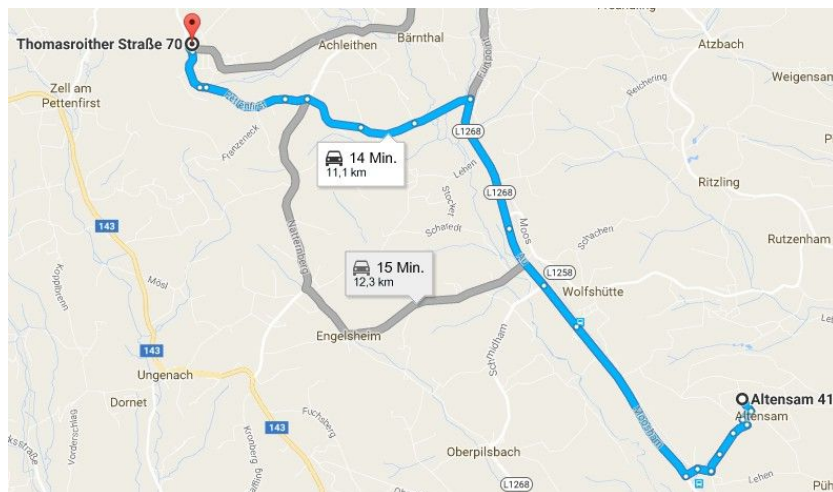


Abbildung 3: Strecke Altensam 41 - Thomasroith⁴

Weitere Gründe für dieses Projekt waren die Tatsachen, dass das Fahrzeug im Betrieb keine Emissionen und laute Geräusche erzeugt. Da das Fahrzeug zu Hause geladen wird, sollten auch keine Emissionen anfallen, da unser Energiebetreiber KWG den Strom zu 100% aus erneuerbaren Energien erzeugt.⁵

Um die Kosten gering zu halten, wurde ein Motorrad für das Vorhaben ausgewählt, da mit dem geringen Eigengewicht relativ gute Fahrleistungen zu erzielen sind. Da es in Österreich erlaubt ist mit einem einspurigen Kraftfahrzeug bei ampelgeregelten Kreuzungen, soweit es die Platzverhältnisse zulassen, nach vorne zu fahren, bietet ein Motorrad einen weiteren Vorteil.

Außerdem finde ich es wichtig, meinen Kindern zu zeigen, dass man bestehende Ressourcen nutzen soll anstatt veraltete Dinge einfach wegzuwerfen und durch neue zu ersetzen.

1.3 E-Motorräder im Straßen- und Rennbetrieb

In der Motorradszene haben sich elektrisch betriebene Fahrzeuge noch weniger etabliert als Elektroautos in der Allgemeinheit. Wie auch bei den Elektroautos sind hier die geringe Reichweite und der erhöhte Preis ausschlaggebend, sich nicht einmal für so ein Gefährt zu interessieren. Diejenigen, die aber schon einmal mit

⁴ Vgl. <https://www.google.at/maps>, (Stand: 15.09.2016)

⁵ Vgl. <http://kwg.at/fileadmin/documents/Stromkennzeichnungsblatt-2015.pdf>, (Stand: 12.09.2016)

einem Elektromotorrad in Kontakt gekommen sind, können sich zumindest vorstellen welches, Potential in dieser Art von Antriebstechnik steckt. Natürlich kann man mit den von den Herstellern angegebenen Reichweiten, keine Tagestouren von 400 *km* und weiter bestreiten, weil man wahrscheinlich die Traktionsbatterie öfters laden müsste. Hat man jedoch einmal die Leistungsfähigkeit solcher Antriebe erlebt und verwendet man das Fahrzeug zum Pendeln oder für kurze Ausfahrten, haben diese Konzepte sehr wohl eine Berechtigung auf dem Markt.

Der Autor selbst konnte bei einem Motorradtesttag des Verbandes der österreichischen Zweiradindustrie und Zweiradimporteure am 11.06.2016 im Fahrtechnikzentrum des ÖAMTC in Marchtrenk⁶ die Leistungsfähigkeit des elektrisch betriebenen Rollers BMW C Evolution⁷ miterleben. Dem Autor war es trotz eines Fahrzeuges mit viel höherer Nennleistung, einer KTM 1290 Super Adventure R⁸, bei normaler Fahrweise nur sehr schwer möglich, den Roller zu überholen. Auf dem engen, kurvig bis winkeligen Kurs des ÖAMTC Fahrtechnikzentrums in Marchtrenk spielte der C Evolution den Drehmomentvorteil des Elektromotors vollends aus. Dadurch war es dem Rollerpiloten am Kurvenausgang immer möglich stärker zu beschleunigen, als die benzinbetriebenen Motorräder. Nur auf einer kurzen Geraden blieb die Möglichkeit des Überholens, da die Endgeschwindigkeit des Rollers zu gering war. Leider blieb es dem Autor verwehrt, den BMW C Evolution selbst zu testen.

1.3.1 Leistungsfähigkeit von Elektromotorrädern im Motorsport

Im Jahr 2009 fand im Rahmen der „Isle of man TT“ das erste Rennen für Elektromotorräder, der TTXGP Time Trials Extreme Grand Prix, auf dem Snaefell Mountain Course statt. Von 2010 bis heute findet das Rennen unter der Bezeichnung SES TT Zero Race mit dem Hauptsponsor SES (Société Européenne des Satellites, zu Deutsch Europäische Satellitengesellschaft) statt. Das erste Rennen auf

⁶ Vgl.

http://www.arge2rad.at/index.php?aufruf_presse=gratis_motorrad_testtage_3x_oestterreich_2016.html&id=128 (Stand: 12.11.2016)

⁷ Vgl. http://www.bmw-motorrad.at/at/de/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.at/at/de/fascination/modern_mobility/overview_mobility.html (Stand: 12.11.2016)

⁸ Vgl. <http://www.ktm.com/at/travel/1290-super-adventure-r/> (Stand: 12.11.2016)

dem 60,725 km langen Kurs gewann der Engländer Robert Barber auf einer Agni X01 mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von $140,71 \frac{km}{h}$ bei einer Zeit von 25 min 53,5 s. Den bestehenden Rundenrekord stellte 2015 der Engländer John McGuinness auf einer 2015 JM Mugen Shinden auf. Er umrundete die Strecke in 18 min 58.743 s und erreichte eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $191,96 \frac{km}{h}$.⁹ Diese Zeiten zeigen, wie rasant sich diese Technologie entwickelt. In sechs Jahren konnten auf der gleichen Strecke die Rundenzeit um beinahe 7 min verkürzt werden und die Durchschnittsgeschwindigkeit erhöhte sich um ca. $50 \frac{km}{h}$.

Einen weiteren Beweis für die Leistungsfähigkeit von Elektromotorrädern erbrachte der US-Amerikaner William Morrison (Chip) Yates III. Er errang mit seinem ca. 240 PS starken Elektromotorrad 8 FIM Geschwindigkeitsweltrekorde, einen Guinness Weltrekord für das weltschnellste Elektromotorrad und einen Rekord für die schnellste Zeit in seiner Klasse beim internationalen Bergrennen am Pikes Peak PPIHC (Pikes Peak International Hill Climb). Zusätzlich hält er noch 8 Weltrekorde mit seinem elektrisch betriebenen Flugzeug.¹⁰

Außerdem hält er einige Patente für KERS-Systeme (kinetic energy recovery system), welche die Bremsenergie an der Front des Motorrades umwandeln, ohne das Motorrad zu destabilisieren. Eines dieser Systeme funktioniert, indem eine oder zwei Wellen durch Winkelgetriebe am Vorderrad angetrieben werden, diese Energie wird über mehrere Übersetzungen und Kupplungen im Generatorbetrieb verwendet, um den Motor an zu treiben. Ein anderes System verwendet eine Hydraulikpumpe, welche vom Vorderrad angetrieben wird und einen Hydraulikmotor, welcher den Elektromotor im Generatorbetrieb antreibt.¹¹ Diese Systeme arbeiten über die Front, da mehr als 70% der benötigten Bremsenergie vom Vorderrad übernommen wird.

Der US-Amerikaner Carline Dunne schaffte 2013 beim Pikes Peak International Hill Climbe eine Sensation. Er war mit seinem Racebike von Lighting Electric Mo-

⁹ Vgl. <http://www.iomtt.com/TT-Database.aspx> (Stand: 09.11.2016)

¹⁰ Vgl. <http://www.rockstarofscience.com/index.html> (Stand: 11.11.2016)

¹¹ Vgl. Yates / Ingram; 2012; S.1-17

torcycles nicht nur Schnellster in seiner Klasse, sondern auch gesamt Schnellster.¹²

In den Jahren zwischen 2010 und 2012 gab es die TTXGP-Weltmeisterschaft und die FIM E-Power International Championship. Leider gab es zwischen den beiden Veranstaltern immer wieder Streitereien, sodass es nicht möglich war, eine gemeinsame Rennserie auf die Beine zu stellen. Heute findet man nur noch bei Wikipedia etwas über die beiden Rennserien, oder wenn man auf den Internetseiten der damaligen Rennstelle recherchiert, solange diese noch existieren. An dieser Stelle sei zu erwähnen, dass das Deutsche Münch-Racing Team in beiden Rennserien mehrmals den Konstrukteurs- als auch den Fahrerweltmeister stellte.¹³

1.3.2 Straßenzugelassene Elektromotorräder im deutschsprachigen Raum

Dieses Unterkapitel betrachtet die im deutschsprachigen Raum zum Kauf angebotenen Elektromotorräder ab der Führerscheinklasse A1, also Mopeds und Mofas wurden nicht recherchiert.

Die Vereinigten Staaten von Amerika waren Vorreiter im Bau von Elektromotorrädern. Mit Zero Motorcycles¹⁴, Brammo¹⁵ und Lightning Electric Motorcycles¹⁶ gab es gleich drei Produzenten von Elektromotorrädern. Zero und Brammo boten ihre Modelle auch in Europa zum Kauf an. Die Brammo Motorradsparte wurde zwischenzeitlich von „Polaris“¹⁷ übernommen und liefert zurzeit nicht nach Europa. Somit gibt es in Europa nur noch die verschiedenen Zero Modelle zu kaufen.

Die vier großen japanischen Hersteller Honda, Yamaha, Kawasaki und Suzuki bieten derzeit kein straßenzugelassenes E-Motorrad an. Beinahe jeder dieser Hersteller hat Konzept-Bikes, aber noch keine käufliche Massenware.

¹² Vgl. <http://lightningmotorcycle.com/lightning-beats-the-world-best-gas-motorcycles-at-ppiwc/> (Stand: 14.11.2016)

¹³ Vgl. <http://www.kradblatt.de/2013-11-02-09-27-53/sonstiges/101-sport/1789-rueckblick-auf-das-muenchen-elektro-racing-team> (Stand: 14.11.2016)

¹⁴ Vgl. http://www.zeromotorcycles.at/index_at.html (Stand: 04.11.2016)

¹⁵ Vgl. <https://www.brammo.com/> (Stand: 04.11.2016)

¹⁶ Vgl. lightningmotorcycle.com (Stand: 15.11.2016)

¹⁷ Vgl. <http://www.polaris.com/en-us> (Stand: 04.11.2016)

In Europa sieht es anders aus. BMW bietet den großen Roller C Evolution¹⁸, KTM bietet mit der Freeride-Serie eine Supermoto und eine Enduro¹⁹, welche für den Straßenverkehr zugelassen sind. Ein zweiter österreichischer Hersteller ist die kleine Manufaktur Johammer, welche mit ihrem Johammer J1²⁰ das wohl futuristischste Motorrad auf dem Markt gebracht hat. Die wohl stärksten und sportlichsten europäischen E-Motorräder stammen aus Italien. Die Firma Energica hat mit der EGO²¹ im Sportmotorradsektor und mit der EVA²² im Naked-Bike Sektor, zwei vollwertige Motorräder auf den Markt gebracht.

Anbei eine Tabelle mit den derzeit am Markt erhältlichen Elektromotorrädern.

Hersteller	KTM
Modelle (2)	Freeride E-SM (Supermotor); E-XC (Enduro)
Modellunterschiede	Design und Fahrwerkssetup
Preis	€ 10680,-
Nennleistung	11 kW
Nerndrehmoment	42 Nm
Reichweite	? 1h nach Fahrweise
Nominelle Akkuleistung	2,6 kWh
Motor-Type	Bürstenloser Permanentmagnetmotor
Akku-Type	Lithium-Ionen
Internetseite	http://www.ktm.com/at/e-ride/

Hersteller	BMW
Modelle (2)	C Evolution basic / C Evolution long range
Modellunterschiede	Leistung, Reichweite
Preis	ca. € 15000,-
Nennleistung	11kW / 19kW
Nerndrehmoment	72 Nm
Reichweite (kombiniert)	bis zu 160 km
Nominelle Akkuleistung	8 kWh
Motor-Type	permanenterregter Synchronmotor
Akku-Type	Lithium Ionen
Internetseite	http://www.bmw-motorrad.at/at/de/index.html

¹⁸ Vgl. http://www.bmw-motorrad.at/at/de/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.at/at/de/fascination/modern_mobility/overview_mobility.html (Stand: 12.11.2016)

¹⁹ Vgl. <http://www.ktm.com/at/e-ride/> (Stand: 15.11.2016)

²⁰ Vgl. <http://www.johammer.com/elektromotorrad/> (Stand: 15.11.2016)

²¹ Vgl. <http://www.energicamotor.com/energica-ego-electric-superbike/> (Stand: 15.11.2016)

²² Vgl. <http://www.energicamotor.com/energica-eva-electric-streetfighter/> (Stand: 19.11.2016)

Hersteller	Zero
Modelle (15)	S ZF6.5 / S ZF13.0 / S ZF13.0 + Power Tank (auch mit 11 kW) SR ZF13.0 / SR ZF13.0 + Power Tank DS 11 kW ZF6.5 / DS ZF13.0 / DS ZF13.0 + Power Tank DSR ZF13.0 / DSR ZF13.0 + Power Tank FX ZF6.5 / FXS ZF6.5
Modellunterschiede	Leistung, Reichweite, Design und Fahrwerkssetup
Preis	zwischen € 12190,- und € 18290,- in der Grundausstattung
Nennleistung	11 kW bis 22 kW
Nenndrehmoment	106 Nm bis 110 Nm
Reichweite (kombiniert)	79 km bis 217 km, je nach Akkugröße
Nominelle Akkuleistung	5,7 kW bis 14,3 kW, je nach Akkugröße
Motor-Type	bürstenloser Permanentmagnetmotor
Akku-Type	Lithium Ionen
Internetseite	http://zeromotorcycles.at/index_at.html

Hersteller	Johammer
Modelle (2)	J1
Modellunterschiede	Reichweite
Preis	€ 22900,- / € 24900,-
Nennleistung	11 kW
Nenndrehmoment	?
Reichweite (kombiniert)	160 km / 200 km
Nominelle Akkuleistung	8,3 kWh / 12,7 kWh
Motor-Type	permanenterregter Synchronmotor
Akku-Type	Lithium Ionen
Internetseite	http://www.johammer.com/elektromotorrad/

Hersteller	Energica
Modelle (2)	EGO / EVA
Modellunterschiede	Design und Fahrwerkssetup
Preis	ca. € 30000,-
Nennleistung	100 kW / 70 kW
Nenndrehmoment	195 Nm / 175 Nm
Reichweite (kombiniert)	bis zu 200 km
Nominelle Akkuleistung	11,7 kWh
Motor-Type	Ölgekühlter Permanentmagnet Synchronmotor
Akku-Type	Lithium Ionen
Internetseite	www.energicamotor.com/en/

Tabelle 1: Elektromotorradmodelle im deutschsprachigen Raum

1.4 Methodik

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist der Umbau von einem Verbrennungsmotor getriebenen, einspurigen Kfz auf einen rein elektrisch betriebenen Antrieb. Dieses Fahrzeug sollte günstig im Unterhalt sein, im Betrieb keine Emissionen verursachen und lärmarm agieren. Außerdem muss es so gebaut werden, dass es in späterer Folge straßenzulassungstauglich ist.

Um diese Ziele zu erreichen, sind mehrere Arbeitspakete von Nöten, welche auch ineinander greifen.

Zuerst wird der Antrieb grundsätzlich ausgelegt. Wenn dies geschehen ist, wird ein passendes, gebrauchtes Motorrad benötigt. Dieses soll nach der Entkernung und Aufbereitung soweit sein, dass die neuen Antriebskomponenten eingebaut werden können. Danach müssen alle benötigten Halterungen geplant, konstruiert und gefertigt werden. Ist dies geschehen, müssen die einzelnen Komponenten im Rahmen montiert und verkabelt werden. Danach ist es wichtig, dass alle Systeme zusammenspielen und ordnungsgemäß funktionieren. Um feststellen zu können, ob dies der Fall ist, müssen einige Tests durchgeführt werden. In der Testphase sollten auch die neuen Fahreigenschaften und Fahrleistungen des Motorrades beurteilt werden.

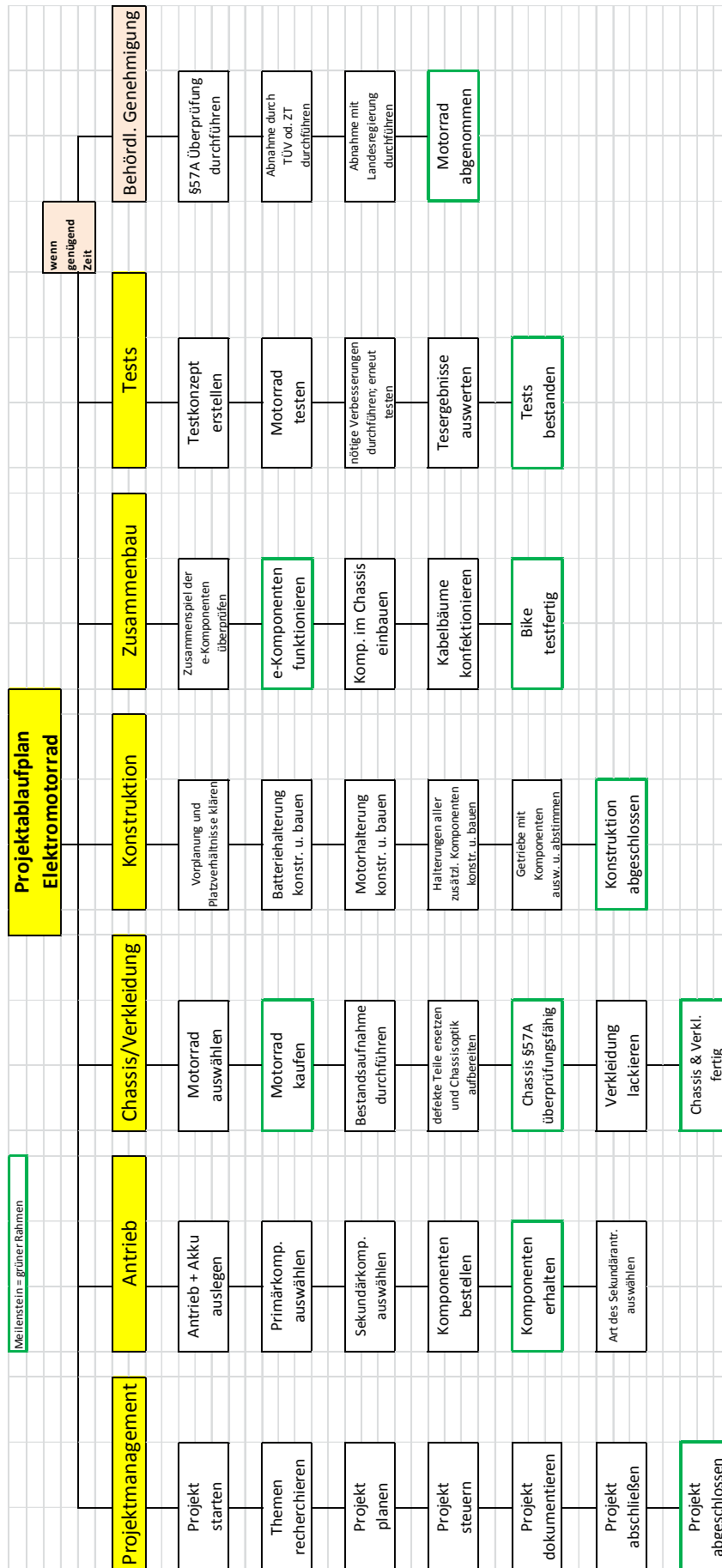


Abbildung 4: Projekttablaufplan

2 Auslegung des elektrischen Antriebs

Der amerikanische Erfinder Odgen Bolton erhielt Ende des Jahres 1895 ein U.S.-Patent für das erste Elektrofahrrad. Dieses Fahrrad glich aber eher einem Laufrad mit elektrischem Antrieb, da es weder eine Tretkurbel noch einen Kettenantrieb besaß. Für den Antrieb diente ein 6-poliger Gleichstrom-Nabenmotor mit Kommutator und Kohlenbürsten. Die Energieversorgung lieferte ein 10-Volt-Akku welcher zwischen Lenk- und Sitzrohr am Oberrohr hing. Mit einer maximalen Stromabgabe von 100 A konnte diese Batterie eine Leistung von 1 kW abgeben. Gesteuert wurde der Antrieb durch einen Schalter am Lenker, welcher über einen Griffhebel betätigt wurde.²³

Dieses Grundkonzept für einen Elektroantrieb ist auch heute noch gültig, denn jedes Antriebssystem besteht aus folgenden Grundkomponenten:

- Elektromotor
- Motorcontroller mit Regelorgan für den Elektromotor
- Traktionsbatterie

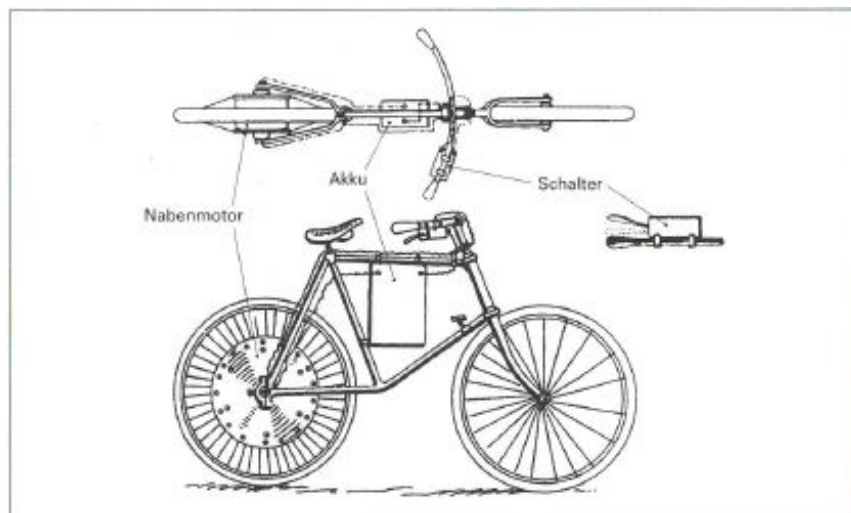


Abbildung 5: Erstes E-Bike aus dem Jahre 1895 von Odgen Bolton, USA²⁴

²³ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S.7

²⁴ Ebd.

2.1 Grundlegende Auslegung der Motorleistung und der Akkukapazität

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte erläutert, die notwendig sind, um bestimmen zu können, welche Motorleistung benötigt wird und wie groß die Kapazität der Antriebsbatterie sein muss. Die einzelnen Formeln beziehen sich auf die Standard SI-Einheiten.

Die „Grundlegende Antriebsauslegung mit Annahmen“ und die „Grundlegende Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl“ werden im Anhang beigelegt. Zu den Berechnungen ist noch zu erwähnen, dass das Berechnungsprogramm „Mathcad“ die SI-Einheiten automatisch in die gewünschten Einheiten konvertiert. Da anfangs die benötigten Komponenten noch nicht fest standen, mussten einige Annahmen getroffen werden.

2.1.1 Berechnung der Übersetzung

Da das Getriebe nur aus dem Kettentrieb besteht, musste zuerst die Übersetzung bestimmt werden, mit welcher die gewünschte Höchstgeschwindigkeit erreicht werden kann. Hierzu wurde zuerst die Nennmotordrehzahl $n_M [\text{min}^{-1}]$ angenommen. Danach wurde anhand der Reifendimension mit den Termen $b_{\text{Reifen}} [\text{mm}]$, $h_{\text{Reifen}} [\text{mm}]$, $d_{\text{Felge in Zoll}}$ und dem Umrechnungsfaktor von Zoll in mm $f_{\text{Zoll in mm}}$ der Raddurchmesser $d_{\text{Rad}} [\text{mm}]$ berechnet. Dieses Ergebnis muss mit $\frac{1}{1000} [\frac{\text{m}}{\text{mm}}]$ multipliziert werden, um $[\text{m}]$ zu erhalten. Anschließend wurden die Nenngeschwindigkeit (\emptyset -Geschwindigkeit) $v_n [\frac{\text{m}}{\text{s}}]$ und die Höchstgeschwindigkeit $v_{\text{max}} [\frac{\text{m}}{\text{s}}]$ angenommen. Danach wurden der Abrollumfang $u_{\text{Rad}} [\text{m}]$ und damit die Raddrehzahl $n_{\text{Rad}} [\text{min}^{-1}]$ ermittelt.

$$d_{\text{Rad}} = 2 * b_{\text{Reifen}} * \frac{h_{\text{Reifen}}}{100} + d_{\text{Felge in Zoll}} * f_{\text{Zoll in mm}} * \frac{1}{1000}$$

Formel 1: Berechnung des Raddurchmessers

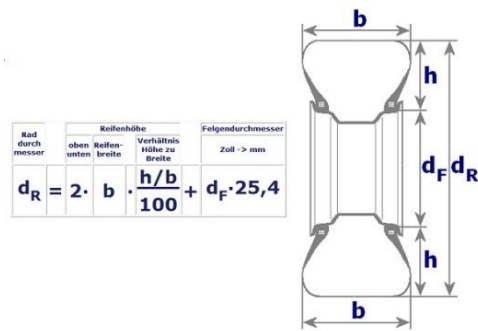


Abbildung 6: Berechnung Raddurchmesser²⁵

Dividiert man die Motordrehzahl durch die Raddrehzahl erhält man die benötigte Übersetzung.²⁶

$$i_{opt} = \frac{n_M}{n_{Rad}}$$

Formel 2: Berechnung der Übersetzung²⁷

2.1.2 Berechnung der Fahrwiderstände

Wie bei jedem Fahrzeug treten bei der Geradeausfahrt eines Motorrads Hemmnisse auf, welche das Fahrzeug behindern. Diese Hemmnisse werden als Fahrwiderstände bezeichnet. Bei der Berechnung der Fahrwiderstände wird zwischen stationären Fahrwiderständen (treten bei gleichförmiger Bewegung auf) und instationären Fahrwiderständen (treten beim Beschleunigen bzw. beim Bremsen auf), unterschieden. „Die zusätzlichen Widerstände bei der Kurvenfahrt werden üblicherweise vernachlässigt, weil sie insbesondere beim Motorrad betragsmäßig klein sind und ihre genaue Berücksichtigung unverhältnismäßig kompliziert wäre.“²⁸ Die Summe des Rollwiderstandes, des Luftwiderstandes und des Steigungswiderstandes bilden den stationären Widerstand.²⁹

Der instationäre Fahrwiderstand ist die Summe aus dem translatorischen Beschleunigungswiderstand, welcher die geradlinige Beschleunigung des gesamten

²⁵ Vgl. <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Reifenberechnung.htm>, (Stand: 27.03.2013)

²⁶ Vgl. Stoffregen, 2010, S.228

²⁷ Vgl. Ebd.

²⁸ Ebd., S.10

²⁹ Vgl. Ebd

Fahrzeuges beschreibt und dem rotatorischen Beschleunigungswiderstand, welcher die Beschleunigung aller drehenden Antriebsteile beschreibt.³⁰

Für die grundlegende Antriebsauslegung genügt die Betrachtung des translatorischen Beschleunigungswiderstandes.

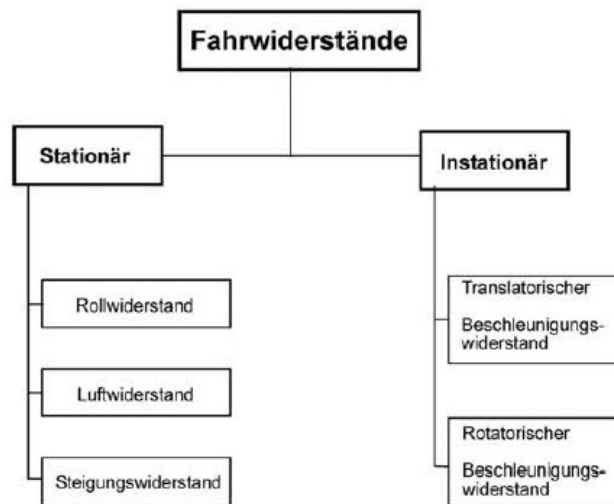


Abbildung 7: Fahrwiderstände³¹

2.1.2.1 Berechnung des Rollwiderstandes

Der Rollwiderstand F_r [N] wird in den Berechnungen mit Hilfe einer Rollwiderstandskoeffiziententabelle vereinfacht ermittelt. Die Formel zur Ermittlung dieses Widerstandes setzt sich wie folgt zusammen:

$$F_r = m_{ges} * g * \mu_r$$

Formel 3: Rollwiderstand³²

Das Gesamtgewicht des Fahrzeuges und des Fahrers m_{ges} [kg] multipliziert mit der Erdbeschleunigung g mit $[9,81 \frac{m}{s^2}]$ multipliziert mit dem Rollwiderstandskoeffizienten μ_r ergibt den Rollwiderstand. Nach der Tabelle im Buch „Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik“ wird der Rollwiderstandskoeffizient mit 0,013 angenommen.

³⁰ Vgl. Stoffregen, 2010, S.15

³¹ Ebd., S.10

³² Vgl. Böhner / Keil / Leyer, 2000, S.69

Straßenbelag	μ_r
Asphalt, Beton	0,013
Pflaster	0,015
Schotter, gewalzt	0,020
Teermakadam	0,025
Erdweg	0,050

Tabelle 2: Rollreibungskoeffizienten³³

2.1.2.2 Berechnung des Luftwiderstandes

Der Luftwiderstand F_L [N] ist das Produkt der Multiplikation der halben Luftdichte $\rho_{Luft} [\frac{kg}{m^3}]$ bei 20°C, multipliziert mit dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , multipliziert mit der Projektionsfläche des Motorrades $A_{Front} [m^2]$ multipliziert mit der Höchstgeschwindigkeit zum Quadrat $v_{max} [\frac{m}{s}]$.³⁴

$$F_L = \frac{\rho_{Luft}}{2} * c_w * A_{Front} * v_{max}^2$$

Formel 4: Luftwiderstand³⁵

Der Luftwiderstandsbeiwert wurde mit 0,5 festgelegt.

2.1.2.3 Berechnung des Steigungswiderstandes

Der Steigungswiderstand F_{st} [N] ist abhängig vom Gesamtgewicht des Fahrzeuges und des Fahrers m_{ges} [kg], der Erdbeschleunigung $g [9,81 \frac{m}{s^2}]$ und dem zu bewältigenden Steigungswinkel.

$$F_{st} = m_{ges} * g * \sin \alpha$$

Formel 5: Steigungswiderstand³⁶

„Da für kleine Steigungswinkel die Beziehung $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ gilt, kann im Straßenbetrieb mit kleinen Winkeln (bei 20 % Steigung ist $\alpha_{st} = 11^\circ$) vereinfacht mit fol-

³³ Vgl. Bohner / Keil / Leyer, 2000, S.69

³⁴ Vgl. Ebd., S. 70

³⁵ Vgl. Ebd.

³⁶ Vgl. Ebd., S. 71

gender Beziehung gerechnet werden.“³⁷ Wobei q die Steigung in Prozent darstellt und mit 15% angenommen wird. Somit gilt: $q = 0,15$.

$$F_{st} = m_{ges} * g * q$$

Formel 6: vereinfachter Steigungswiderstand³⁸

2.1.2.4 Berechnung des gesamten stationären Fahrwiderstandes

Addiert man den Rollwiderstand mit dem Luftwiderstand und dem Steigungswiderstand erhält man den gesamten stationären Fahrwiderstand F_{ges} [N].³⁹

$$F_{ges} = F_r + F_L + F_{st}$$

Formel 7: gesamter stationärer Fahrwiderstand⁴⁰

2.1.2.5 Berechnung des translatorischen Beschleunigungswiderstandes

Um den translatorischen Beschleunigungswiderstand $F_{a,trans}$ [N] zu berechnen wird das Gesamtgewicht des Fahrzeuges und des Fahrers m_{ges} [kg] mit der Beschleunigung a_{trans} [$\frac{m}{s^2}$] multipliziert.⁴¹ Zuerst muss aber die Beschleunigungszeit Δt [s] festgelegt werden, in der die Nenngeschwindigkeit v_n [$\frac{m}{s}$] erreicht werden soll. Damit kann man die gewünschte Beschleunigung berechnen.⁴²

$$a_{trans} = \frac{v_n}{\Delta t}$$

Formel 8: translatorische Beschleunigung⁴³

$$F_{a,trans} = m_{ges} * a_{trans}$$

Formel 9: translatorischer Beschleunigungswiderstand⁴⁴

³⁷ Stoffregen, 2010, S.14

³⁸ Vgl. Ebd.

³⁹ Vgl. Ebd., S.16

⁴⁰ Vgl. Ebd.

⁴¹ Vgl. Ebd, S.15

⁴² Vgl. Bohner / Keil / Leyer, 2000, S.29

⁴³ Vgl. Ebd.

⁴⁴ Vgl. Stoffregen, 2010, S.15

2.1.3 Berechnung des Motorleistungsbedarfs

Nachdem alle erforderlichen Fahrwiderstände bekannt sind, können die Motorleistung und das Drehmoment veranschlagt werden. Hierzu muss zusätzlich noch der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} angenommen werden. Dieser setzt sich aus dem Wirkungsgrad des Motors η_M , welcher mit „0,92“⁴⁵ festgelegt wird und dem angenommenen mechanischen Wirkungsgrad η_{AS} des Antriebsstrangs. Dieser wird durch den Kettenantrieb verursacht und wird mit 93% angenommen.⁴⁶

$$\eta_{ges} = \eta_M * \eta_{AS}$$

Formel 10: Ermittlung des angenommenen Gesamtwirkungsgrades⁴⁷

2.1.3.1 Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände

Die Motorleistung zur Überwindung der gesamten stationären Fahrwiderstände P_{FW} [W] ergibt sich aus der Multiplikation des gesamten stationären Fahrwiderstandes F_{ges} [N] mit der Nenngeschwindigkeit v_n [$\frac{m}{s}$].

$$P_{FW} = F_{ges} * v_n$$

Formel 11: Motorleistung zur Überwindung der Fahrwiderstände⁴⁸

Das Motordrehmoment M_{FW} [Nm] ergibt sich aus der Division der Motorleistung zur Überwindung der Fahrwiderstände P_{FW} [W] mit der Winkelgeschwindigkeit, welche das Produkt aus 2 mit π und der Nennmotordrehzahl n_M [sec^{-1}] ist.

$$M_{FW} = \frac{P_{FW}}{2 * \pi * n_M}$$

Formel 12: Motordrehmoment zur Überwindung der Fahrwiderstände⁴⁹

⁴⁵ Vgl. http://www.quadmotion.se/shop/files/ME0913_Mars180A/Manufacturer_Specs.en.pdf, (Stand: 30.09.2016)

⁴⁶ Vgl. Stoffregen, 2010, S.19

⁴⁷ Vgl. Böhner / Keil / Leyer, 2000, S.89

⁴⁸ Vgl. Ebd., S.71

⁴⁹ Vgl. Ebd., S.32

2.1.3.2 Benötigte Beschleunigungsleistung

Ändert man die konstante Geschwindigkeit v_n in $[\frac{m}{s}]$ in der Grundformel für die Leistung „ $P = F * v$ “⁵⁰ in eine Geschwindigkeitsänderung Δv_n in $[\frac{m}{s}]$, um aus dem Stand ($v = 0 \frac{m}{s}$) auf die gewünschte Nenngeschwindigkeit v_n in $[\frac{m}{s}]$ zu kommen, erhält man die Beschleunigungsleistung P_B in $[W]$.

$$P_B = F_{a,trans} * \Delta v_n$$

Formel 13: Beschleunigungsleistung⁵¹

Setzt man in Formel 12 anstatt der Leistung zur Überwindung der stationären Fahrwiderstände P_{FW} die Beschleunigungsleistung P_B ein, erhält man das gewünschte Beschleunigungsmoment in $[Nm]$.

$$M_B = \frac{P_B}{2 * \pi * n_M}$$

Formel 14: Beschleunigungsmoment⁵²

2.1.3.3 Bestimmung der Nennleistung und des Nenndrehmoments

Aus den vorliegenden Berechnungen werden nun das höchste benötigte Drehmoment und die höchste benötigte Leistung ausgewählt und diese jeweils durch den Gesamtwirkungsgrad η_{ges} dividiert. Mit diesen Werten erhält man die Auslegungsdaten mit denen der richtige Motor ausgewählt werden kann.⁵³

$$P_{nenn} = \frac{\max(P_{FW}, P_B)}{\eta_{ges}}$$

Formel 15: benötigte Nennmotorleistung⁵⁴

$$M_{nenn} = \frac{\max(M_{FW}, M_B)}{\eta_{ges}}$$

Formel 16: benötigtes Nennmotordrehmoment⁵⁵

⁵⁰ Bohner / Keil / Leyer, 2000, S.32

⁵¹ Vgl. Ebd.

⁵² Vgl. Ebd.

⁵³ Vgl. Bohner / Keil / Leyer, 2000, S.72

⁵⁴ Vgl. Ebd.

⁵⁵ Vgl. Ebd

2.1.4 Auslegung des Energiespeichers

Die Antriebsbatterie ist mitunter eines der wichtigsten Bauteile. Vor allem ist die Kapazität der Zellen ausschlaggebend für die Reichweite. Deshalb sollte die Kapazität der einzelnen Zellen so groß wie möglich sein. Wichtig ist auch die Spannung U in $[V]$, denn je höher die Batteriespannung ist, desto höher kann, je nach Motor, die Motordrehzahl sein. Das Motordrehmoment ist wiederum abhängig von der abgegebenen Stromstärke I in $[A]$.⁵⁶

2.1.4.1 Bestimmung der benötigten Kapazität

Damit man für die gewünschte Reichweite s_{max} in $[m]$ die erforderliche Kapazität K_n in $[As]$ berechnen kann, muss man die mechanische Arbeit W_m in $[Ws]$ mit der elektrischen Energie E_e in $[Ws]$ gleichsetzen.

$$E_e = W_m$$

$$U * I * t = F * s$$

Formel 17: Gegenüberstellung mechanische Arbeit - elektrische Energie⁵⁷

Um mit der benötigten Nennmotorleistung P_{nenn} rechnen zu können, muss man F durch $\frac{P_{nenn}}{v_n}$ ersetzen und W_m durch U_n dividieren. Somit erhält man die benötigte Kapazität K_n der Traktionsbatterie, da die Formel der Kapazität K_n in $[As]$ das Produkt aus der Stromstärke I in $[A]$ mit der Zeit t in $[s]$ ist.⁵⁸

$$K_n = I_n * t.$$

Formel 18: Kapazität⁵⁹

$$K_n = \frac{P_{nenn} * s_{max}}{U_n * v_n}$$

Formel 19: Berechnung der benötigten Kapazität

⁵⁶ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S.81 – S.83

⁵⁷ Vgl. Babel, 2009, S.4 – S.5

⁵⁸ Vgl. Bohner / Keil / Leyer, 2000, S.90

⁵⁹ Vgl. Ebd.

2.1.4.2 Berechnung des Maximalstroms

Um den Maximalstrom I_{max} in [A] ermitteln zu können, muss die Formel für die elektrische Leistung umgewandelt werden.⁶⁰

$$P = U \cdot I$$

Formel 20: elektrische Leistung⁶¹

$$I_{max} = \frac{P_{nenn}}{U_n}$$

Formel 21: Berechnung des Maximalstromes

2.1.5 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen

Die angeführten Ergebnisse stammen aus den beiden, anhängenden Berechnungen. Zum einen die „Grundlegende Antriebsauslegung mit Annahmen“ und zum anderen die „Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl“. Hier werden nur die wichtigsten Werte angeführt, welche zur Auswahl der Komponenten herangezogen wurden und zur Gegenüberstellung die Werte, welche mit Hilfe der Datenblätter verändert werden mussten.

2.1.5.1 Ergebnisse aus der Berechnung „Grundlegende Antriebsauslegung mit Annahmen“

$$P_{nenn} \approx 12,7 \text{ kW}$$

$$M_{nenn} \approx 24,3 \text{ Nm}$$

$$K_n \approx 120,9 \text{ Ah}$$

$$I_{max} \approx 172,7 \text{ A}$$

2.1.5.2 Ergebnisse aus der Berechnung „Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl“

In der Berechnung „Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl“ wurde die Reifengröße des gekauften Motorrades eingesetzt. Durch die vorgegebene Zellenanzahl änderte sich auch die Nennspannung.

⁶⁰ Vgl. Babel, 2009, S.5

⁶¹ Babel, 2009, S.5

Mit Hilfe der Spannungskonstanten aus dem Motordatenblatt, der Zellenzahl und der Zellenspannung wurde eine Spannungs-Drehzahl-Tabelle erstellt, mit welcher die Nennspannung der Antriebsbatterie und die Motordrehzahl festgelegt werden konnten.

Zellenanzahl	Zellen-Nennspannung [V]	Spannungskonstante [min ⁻¹ /V]	Motordrehzahl [min ⁻¹]
1	3,2	50	160
2	6,4	50	320
3	9,6	50	480
4	12,8	50	640
5	16	50	800
6	19,2	50	960
7	22,4	50	1120
8	25,6	50	1280
9	28,8	50	1440
10	32	50	1600
11	35,2	50	1760
12	38,4	50	1920
13	41,6	50	2080
14	44,8	50	2240
15	48	50	2400
16	51,2	50	2560
17	54,4	50	2720
18	57,6	50	2880
19	60,8	50	3040
20	64	50	3200
21	67,2	50	3360
22	70,4	50	3520
23	73,6	50	3680
24	76,8	50	3840
25	80	50	4000
26	83,2	50	4160
27	86,4	50	4320
28	89,6	50	4480
29	92,8	50	4640
30	96	50	4800

Tabelle 3: Spannungs-Drehzahl-Tabelle

Durch diese Änderungen veränderte sich die Übersetzung i_{opt} .

Durch die geringere Nennspannung U_n von 70,4 [V] anstatt der angenommenen 73,6 [V] ergab sich eine höhere benötigte Kapazität K_n von 126,4 [Ah] um die gewünschte Reichweite von 35 [km] zu erlangen.

Aufgrund des verwendeten Zellentyps, siehe Kapitel 2.2.1 und der gegebenen Platzverhältnisse im Rahmen musste nun die mögliche Reichweite $s_{moeglich}$ in [km] ermittelt werden. Dies erfolgte durch die Umwandlung der Formel für die benötigte Kapazität K_n und das Ersetzen von K_n durch K_{90} , wodurch die durch die Zellen gegebenen 90 [Ah] berücksichtigt wurden.

$$s_{moeglich} = \frac{K_{90} * U_n * v_n}{P_{nenn}}$$

Formel 22: mögliche Reichweite

Dies ergab eine mögliche rechnerische Reichweite von:

$$s_{moeglich} \approx 24,9 \text{ km}$$

2.2 Benötigte Komponenten für den Primärantrieb

Mit Hilfe der Ergebnisse der Berechnung „Grundlegende Antriebsauslegung mit Annahmen“ wurden die drei Hauptkomponenten des elektrischen Antriebes ausgewählt.

2.2.1 Auswahl des Zellentyps für die Traktionsbatterie

Das eigentliche Herzstück eines elektrischen Antriebs ist die Traktionsbatterie. Mit ihren Kenngrößen beeinflusst sie den Bewegungsradius und die Fahrleistungen eines elektrisch betriebenen Kraftfahrzeugs.

Eine Antriebsbatterie besteht aus mehreren zusammengeschalteten Zellen. Der Zellentyp, die Zellenanzahl und die Art, wie die Zellen verschaltet sind (parallel oder seriell), bestimmen die mögliche Leistung der Antriebsbatterie. Wenn man die Zellen in Serie schaltet, addiert sich die Spannung, wenn man sie parallel

schaltet, addiert sich die Kapazität.⁶² Die Verschaltung der einzelnen Zellen ist abhängig von der Zellenbauform und Kapazität der jeweiligen Zellen und dem Platzangebot im Fahrzeug.

Für die Auswahl der Zellen ist es wichtig, dass die Energiedichte und die Leistungsdichte so hoch wie möglich sind, dass die Zellen kostengünstig sind und dass die Verschaltung der Zellen untereinander einfach zu handhaben ist.

„Die Energiedichte (spezifische Energie) ist ein Maß, das die Kapazität eines Energieträgers im Verhältnis zum Gewicht beschreibt. Je höher die Energiedichte, umso leichter wird der Akku bei gleicher Kapazität. Die Einheit ist Wh/kg. Manchmal wird die Energiedichte mit der Einheit Wh/dm³ auf das Volumen bezogen.“⁶³

„Die Leistungsdichte wird entweder auf das Volumen oder das Gewicht bezogen. Für Fahrzeuge ist das Gewicht maßgebend. Der Wert sagt, wie viel Leistung pro Akkugewicht entnommen werden kann, ohne dass der Akku Schaden nimmt.“⁶⁴

Vergleicht man die unterschiedlichen Typen, der zur Wahl stehenden Sekundärelemente anhand ihrer Leistungsdichte und der Energiedichte, fallen die Blei-Akkumulatoren aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit, dem Gewicht und der Baugröße aus der Auswahl. Nickel-Cadmium-Akkus entfallen wegen des Memory-Effekts, den diese Zellentypen innehaben. „Wird ein NiCd-Akku immer nur zu einem bestimmten Teil seiner Kapazität entladen, dann „merkt“ sich die Batterie dies und gibt darüber keine Energie frei, auch wenn es von ihr einmal gefordert wird.“⁶⁵ Die Nickel-Metallhydrid-Akkus weisen zwar keinen Memory-Effekt auf, liegen aber bei der Energiedichte und der Zellennennspannung hinter den Lithium-Akkus.⁶⁶

⁶² Vgl. Böhner / Keil / Leyer, 2000, S.90

⁶³ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S.118

⁶⁴ Vgl. Ebd.

⁶⁵ Ebd., S.123

⁶⁶ Vgl. Ebd., S.120

Akku-Type Volt/Zelle	Energiedichte [Wh/kg]	Entladetiefe [%]	Lebenszyklen	Selbstentladung pro Monat
Blei-Akku 2V	30	20 80	1500 100	10-15%
NiCd 1,2V	50	20 80	700 500	30%
NiMH 1,2V	70	20 80	1000 500	30%
Li-Ionen 3,6V	150	20 80	2000 500	<2%

Tabelle 4: Kenndaten von Akkus (Auswahl)⁶⁷

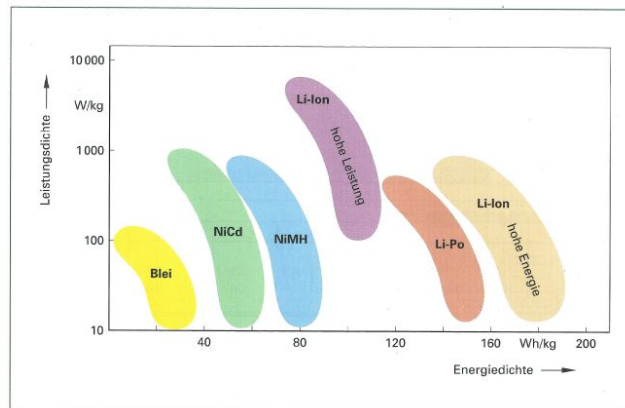


Abbildung 8: Vergleich von Leistungs- und Energiedichte einiger Energiespeicher⁶⁸

Betrachtet man Abbildung 8, sieht man gleich, dass die Lithium-Akkumulatoren, von der Leistungs- und Energiedichte einen Vorteil gegenüber den anderen angeführten Sekundärelementen haben. Deshalb waren dies die Typen die näher betrachtet wurden.

Obwohl Lithium-Polymer Zellen über eine hohe Nennspannung verfügen (3,7 V) und eine hohe Energiedichte (bis $200 \frac{Wh}{kg}$) aufweisen,⁶⁹ wurde dieser Zellentyp nach einigen Recherchen und Gesprächen mit Modellbauern nicht näher betrachtet. Nach den Aussagen der Modellbauer neigt dieser Akkumulator-Typ bei Überlastung, im schlimmsten Fall, zur Selbstentzündung, außerdem hätte sich das Erreichen von hohen Kapazitäten nur mit erheblichen, finanziellen Aufwand bewerkstelligen lassen. Ein weiterer, für die Entscheidung gegen Lithium-Polymer Sekun-

⁶⁷ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S. 120

⁶⁸ Ebd., S. 114

⁶⁹ Vgl. Ebd., S. 129

därelemente, war die, im Vergleich zu andern Lithium-Typen, geringe Lebensdauer mit nur 300 Ladezyklen.⁷⁰

Für dieses Projekt schienen Lithium-Eisen-Phosphat-Akkus ($LiFePO_4$) in Quaderform von Vorteil zu sein. Durch die vorteilhafte Quaderform ist eine Konstruktion der Batteriehalterung leichter zu bewerkstelligen. Die einzelnen Zellen sind, gegenüber den Lithium-Polymer-Zellen, mit hohen Kapazitäten erhältlich und besitzen eine Zellen-Nennspannung von ca. 3,3 V, eine Energiedichte von etwa $150 \frac{Wh}{kg}$ und eine Lebensdauer von ca. 5000 Ladezyklen. Außerdem kann diese Art von Zellen bei Temperaturen zwischen $-45\text{ }^{\circ}C$ und $60\text{ }^{\circ}C$ betrieben werden.⁷¹

Leider haben alle Lithium-Sekundärelemente einen Nachteil. Sie benötigen zum Laden und Entladen ein Batteriemanagementsystem, kurz BMS oder eine andere Art von Schutzschaltung. Diese Schaltungen dienen dazu, um die einzelnen Zellen vor Tiefentladung, Überladung oder thermischer Überlastung zu schützen. Auf das BMS wird gesondert nochmals eingegangen.⁷²

Ein Lithiumionenakku besteht aus einer Anode aus Lithium und einem Metall, welches die äußere Elektrode bildet, einem Elektrolyten aus gelöstem Lithiumsalz in einem organischen Lösungsmittel, einem Li-Ionen durchlässigen Separator und einer Metallelektrode, welche mit Graphit belegt ist, als Kathode.⁷³ Das Entladen und Laden eines solchen Sekundärelements geht folgendermaßen von statten:

„Im aufgeladenen Zustand befindet sich neutrales Lithium im Graphitbereich am Minuspol. Der Strom der negativen Elementarladungen (Elektronen) geht beim Entladen extern vom Minuspol zum Pluspol. Die Lithium-Atome im Graphitbereich geben dafür jeweils ein Elektron ab und „schwimmen“ dann als Ionen (positiv aufgeladen) zum anderen „Ufer“ – den Metalloxiden am Pluspol. Dort werden Elektronen-Ladungen von der Plus-Elektrode übernommen und aus den Ionen werden wieder neutrale Lithiumatome. Sind alle Lithiumatome im „Metalloxid-Hafen“ angedockt, ist der Akku entla-

⁷⁰ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S.129

⁷¹ Vgl. Ebd., S.130

⁷² Vgl. Ebd., S.130

⁷³ Vgl. Babel, 2009, S.34

den. Durch eine gegenpolige Spannung werden den Lithiumatomen an der Kathode wieder Elektronen entzogen und als Ionen wandern sie zum Minuspol, wo sie durch Aufnahme eines Elektrons von der Anode neutralisieren (der Akku wird geladen).⁷⁴

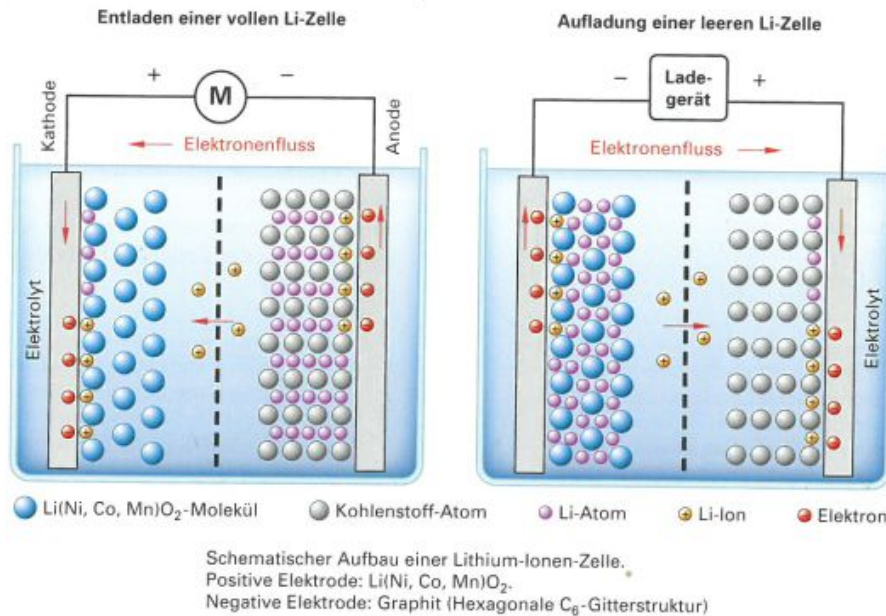


Abbildung 9: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle⁷⁵

Nach Abgleichen von Datenblättern und Preisen wurde entschieden, Zellen von Winston mit einer Kapazität von 90 Ah zu beschaffen, da diese ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen. Die Zellen arbeiten mit einer Nennspannung von 3,2 V und können für 15 min kontinuierlich den dreifachen Entladestrom (3 C) von 270 A abgeben. Kurzzeitig sind die Zellen sogar in der Lage den zehnfachen Entladestrom (10 C) von 900 A zu liefern.⁷⁶

2.2.2 Auswahl des Elektromotors

„Elektrische Motoren wandeln elektrische Energie in mechanische Arbeit um. Ein Elektromotor kann aber auch als Generator arbeiten, der mechanische Arbeit in elektrische Energie umwandelt. In Fahrzeugen kann der

⁷⁴ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S. 128

⁷⁵ Ebd., S. 127

⁷⁶ Vgl. https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/Stoltem/1578/GWL_LFP090Ah-Specifications.pdf, (Stand: 11.10.2016)

Elektromotor daher auch zum Bremsen und Wiederaufladen verwendet werden.⁷⁷

Dies geschieht hauptsächlich über magnetische Felder, da diese über eine größere Energiedichte verfügen als elektrostatische Felder.⁷⁸

Jeder Strom durchflossene Leiter baut ein Magnetfeld auf, die Feldlinien dieses Magnetfeldes bewegen sich in Stromrichtung nach rechts.⁷⁹ Sieht man das Kreuz im Leiter, bedeutet das, dass der Strom vom Betrachter weg fließt. Sieht man jedoch einen Punkt, bedeutet dies, dass der Strom auf den Betrachter zu fließt.⁸⁰

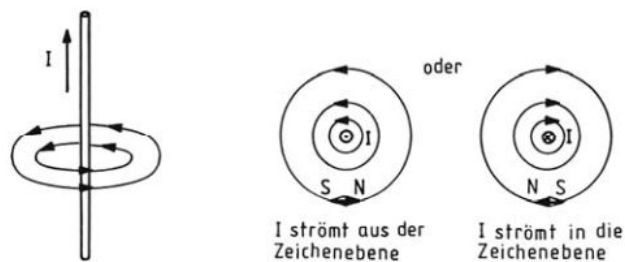


Abbildung 10: Magnetfeld eines langen stromdurchflossenen Stromfadens⁸¹

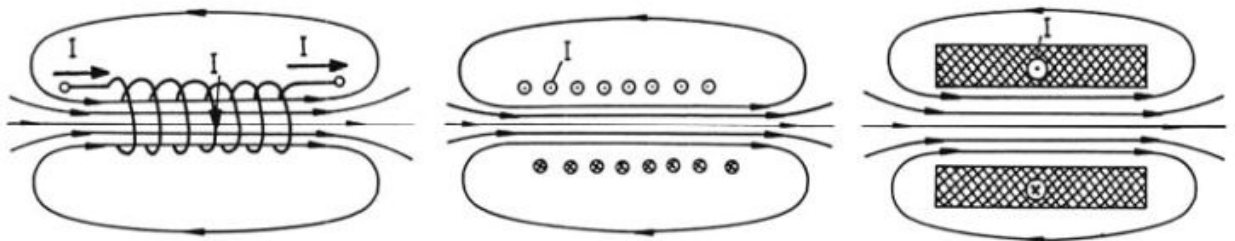


Abbildung 11: Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule⁸²

Bringt man einen stromdurchflossenen Leiter in das Polfeld eines Dauermagneten verhalten sich die beiden Magnetfelder wie folgt.⁸³

„Auf der einen Seite des Leiters verlaufen seine Feldlinien entgegen den Feldlinien des Polfeldes. Hier schwächen die Felder einander. Die Fluss-

⁷⁷ Gressmann / Müller, 2013, S.66

⁷⁸ Vgl. Babel, 2009, S.34

⁷⁹ Vgl. Weißgerber, 2007, S.214

⁸⁰ Vgl. Ebd., S.215

⁸¹ Ebd.

⁸² Ebd.

⁸³ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S.67

dichte nimmt auf dieser Seite des Leiters ab. Auf der anderen Seite des Leiters haben die Feldlinien gleiche Richtung. Auf dieser Seite wird das Feld dichter. Der Leiter wird daher von der Stelle mit großer Flussdichte abgedrängt. Bei umgekehrter Stromrichtung im Leiter wird das gemeinsame Feld auf der anderen Seite dichter und die Bewegungsrichtung ändert sich. Kehrt man die Richtung des Polfeldes um, so ändert sich die Bewegungsrichtung wieder. Ändert man dagegen gleichzeitig Polfeld und Leiterfeld, so bleibt die Bewegungsrichtung des Leiters unverändert.“⁸⁴

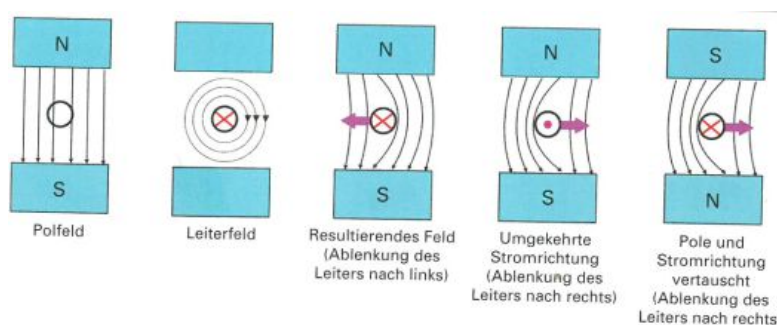


Abbildung 12: Überlagerung zweier elektromagnetischer Felder⁸⁵

„Wird in das Polfeld eine Leiterschleife gebracht, so wird ein Leiterstrang durch das gemeinsame Feld in die eine Richtung abgedrängt, der zurücklaufende Strang in entgegengesetzter Richtung. Dadurch entsteht eine Drehbewegung, womit die einfachste Form des Elektromotors geboren ist.“⁸⁶

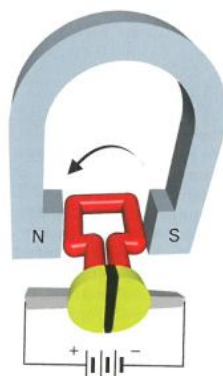


Abbildung 13: Drehung eines Leiterstrangs⁸⁷

⁸⁴ Gressmann / Müller, 2013, S. 67

⁸⁵ Ebd.

⁸⁶ Ebd., S. 68

⁸⁷ Ebd., S. 67

Für dieses Projekt kam von Anfang an nur ein Gleichstrommotor in Frage, deshalb wird auf die verschiedenen Drehstrommotore nicht eingegangen.

Bei einem Gleichstrommotor werden der Erregerstrom in den Ständerwicklungen (Statorwicklungen) und der Ankerstrom von außen zugeführt. Durchfließt Strom die Spulen des Ankers (Rotors), wirkt auf diesen ein Drehmoment. Durch die Drehbewegung wird am Rotor ein Kommutator benötigt, welcher die unterschiedlichen Ankerspulen mit Strom versorgt. Durch den Wechsel der stromdurchflossenen Spulen wird die Drehbewegung des Ankers aufrechterhalten.⁸⁸

Grundsätzlich wären für dieses Projekt ein Gleichstrom-Nebenschlussmotor, ein Gleichstrom-Permanentmotor oder ein Bürstenloser Gleichstrommotor (Elektromotor) interessant gewesen. Die Drehmoment-Drehzahl-Kurven und die Charakteristik der genannten Motoren sind annähernd gleich. Obwohl der Bürstenlose Gleichstrommotor, kurz BLDC (brushless direct current), nur über einen kleinen Drehzahlbereich mit gutem Wirkungsgrad verfügt, wurde entschieden diese Art von Motor zu verwenden. Ein Vorteil des BLDC-Motors liegt darin, dass er über keinen Kommutator verfügt, wodurch die Bürsten und somit Verschleißteile wegfallen. Auch das sogenannte Bürstenfeuer bei höheren Drehzahlen, welches zu hochfrequenten Störungen führen kann, ist bei dieser Art von Motor kein Thema.

BLDC-Motoren besitzen einen Dauermagnetanker ohne Kommutator. Je nach Position des Ankers werden einzelne Statorwicklungen mittels Transistorschaltungen so unter Spannung gesetzt, dass die entstehenden Magnetfelder den Anker weiterbewegen.⁸⁹

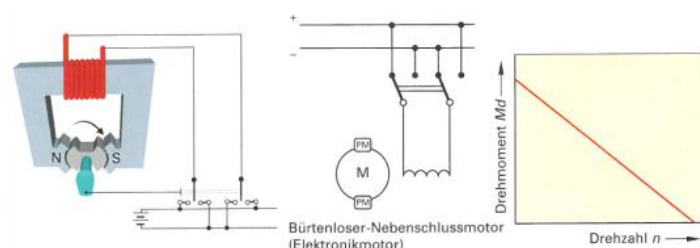


Abbildung 14: Funktionsschema des bürstenlosen Gleichstrommotors mit Schaltbild und Drehzahl/Drehmoment-Charakteristik⁹⁰

⁸⁸ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S.68

⁸⁹ Vgl. Ebd., S.69 - 70

⁹⁰ Ebd., S.70

Die Wahl für den Antriebsmotor fiel auf den Mars ME0913. Dieser besitzt eine Nennleistung von 12 kW bei einer Nenndrehzahl von 3000 min^{-1} und ein Nennmoment von $32,5\text{ Nm}$. Bei einer angelegten Spannung von maximal 96 V können kurzzeitig eine Leistung von 30 kW , ein maximales Moment von 90 Nm erreicht werden.⁹¹

Mit diesen Werten sollten die anfallenden Fahr- und Beschleunigungswiderstände bewältigt werden können.

2.2.3 Auswahl des Motorcontrollers

Der Controller ist ein weiteres Herzstück eines elektrischen Antriebs. Er setzt die Impulse des Fahrers am Regelorgan in Spannungen um. Die Batteriespannung wird stufenlos gedrosselt. Je nach Stellung des Regelorgans wird so der Motor mit Energie versorgt.⁹²

Das Regelorgan ist in diesem Fall ein Drehpotentiometer, welches sich beim Loslassen von alleine, mittels Federkraft, wieder in Null-Stellung bringen muss. Bei einem Motorrad mit Verbrennungsmotor wird durch das Drehen am Gasgriff ein Seil aufgewickelt, wodurch der Vergaserschieber oder die Drosselklappe geöffnet wird. Dadurch wird die Kraftstoffzufuhr geregelt. Bei einem elektrischen Antrieb verhält es sich ähnlich. Durch den veränderlichen Widerstand des Drehpotentiometers „weiß“ der Controller, wie viel Spannung er am Motor anlegen muss und wie viel Strom er dem Motor zuführen muss.

Ein Motorcontroller muss mit dem Motortype übereinstimmen, z. Bsp. eine Steuereinheit für einen Nebenschluss-Gleichstrommotor kann keinen Bürstenlosen Gleichstrommotor ansteuern. Er muss auch mit der Nennspannung, dem Nenn- und dem kurzzeitigen Spitzenstrom der Traktionsbatterie umgehen können. Und er muss die Signale des Regelorgans so umsetzen können, dass der Motor vernünftig darauf anspricht, zum Beispiel wäre es sinnlos, wenn er die variablen Widerstände eines Potentiometers nur mit ein und aus interpretiert. Wenn möglich,

⁹¹ Vgl. http://www.quadmotion.se/shop/files/ME0913_Mars180A/Manufacturer_Specs.en.pdf, (Stand: 30.09.2016)

⁹² Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S. 107

sollte die Motorsteuerung auch in der Lage sein, den Motor als Generator zu nutzen und somit ein regeneratives Bremsen ermöglichen. „Regeneratives Bremsen wird auch Rekuperation genannt, dies bedeutet wiedererlangen, wiedergewinnen.“⁹³

Beim regenerativen Bremsen wird die Bewegungsenergie in elektrischen Strom umgewandelt und der Akku wird aufgeladen.⁹⁴ Da das elektrische Bremsen bei jeder Geschwindigkeit möglich sein soll, muss die erzeugte Spannung bei niedrigen Drehzahlen in eine höhere transformiert werden. Da bei niedrigen Drehzahlen die erzeugte Spannung meist niedriger als die Batteriespannung ist, wird ein DC/DC Hochsetzsteller (Boost-Converter) benötigt.⁹⁵

„Dieser Hochsetzsteller setzt die vom Motor erzeugte Spannung auf das Akku-Niveau herauf, sodass bei fast allen Geschwindigkeiten die Batterie mit Bremsstrom geladen werden kann.“⁹⁶

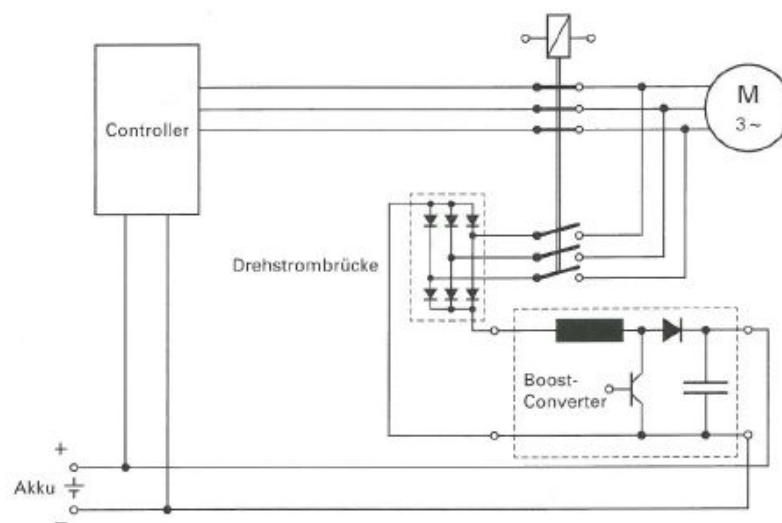


Abbildung 15: Stromlaufplan zum Aufladen des Akkus mittels des Bremsstromes⁹⁷

⁹³ Gressmann / Müller, 2013, S.109

⁹⁴ Vgl. Ebd.

⁹⁵ Vgl. Ebd., S. 112

⁹⁶ Ebd., S.112

⁹⁷ Ebd.

Damit ein Motorcontroller für einen BLDC-Motor in der Lage ist, eine Leistungssteuerung zu generieren benötigt er einen Gleichstromsteller, einen Hochsetzsteller bei Rekuperation und einen Drehstromsteller.⁹⁸

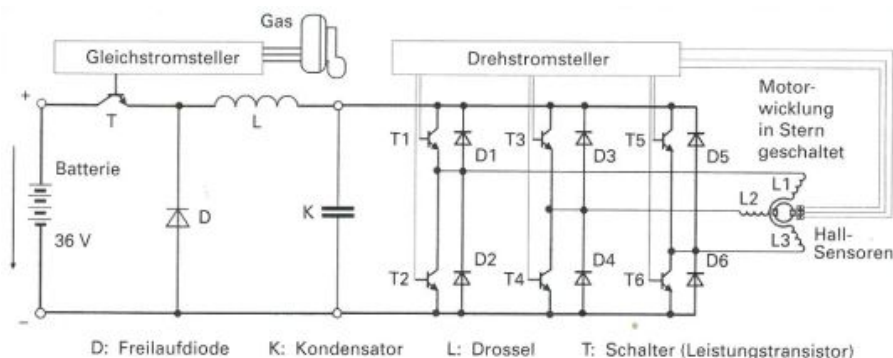


Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung von Gleichstrom- und Drehstromsteller. Beide Steuereinheiten sind Teil des Controllers.⁹⁹

Ein Gleichstromsteller besteht aus einem Tiefsetzsteller (Buck-Converter), welcher die Aufgabe hat, die Batteriespannung U_n in eine variable Spannung am Motor U_M umzuwandeln.

„Bild 1 zeigt die Prinzipschaltung eines Gleichstrom-Stellers. Ist der Schalter T (der in Wirklichkeit ein Leistungstransistor ist, MOSFET = Metal-Oxid-Schicht-Feld-Effekt-Transistor), geschlossen, so ist die Ausgangsspannung U_a gleich der Eingangsspannung U_e . Ist der Schalter offen, dann ist $U_a = 0$ und $U_e =$ Batteriespannung.

Beim Gleichstrom-Steller wird der Schalter periodisch geöffnet und geschlossen (**Bild 2**). Das Verhältnis von Einschaltzeit t_e zur Periodendauer $T (T = t_e + t_a)$ wird als Tastverhältnis bezeichnet. Am Eingang des GS-Stellers ist die Spannung durch die Batterie gegeben. Während der Einschaltphase wird Energie sowohl an den Motor abgegeben als auch in der Drossel gespeichert. Wird der Schalter T geschlossen, so steigt der Strom linear an und fließt durch die Drossel in den ausgangsseitigen Kondensator und den angeschlossenen Motor. Am Ausgang liegt die Spannung U_a .

⁹⁸ Vgl. Gressmann / Müller, 2013, S.95

⁹⁹ Ebd.

Wird der Schalter geöffnet, so fließt der Strom der Diode des Freilaufzweigs. Das zusammenfallende Feld der Drossel treibt den linear abfallenden Strom durch den Motor und Diode. Die in der Induktivität gespeicherte Energie kann durch Verändern des Tastverhältnisses t_e/T variiert werden.“¹⁰⁰

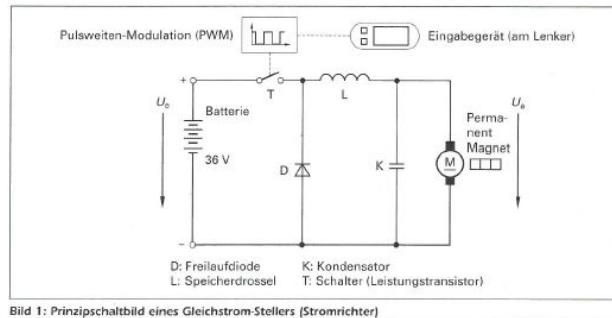


Abbildung 17: Prinzipschaltbild eines Gleichstrom-Stellers (Stromrichter)¹⁰¹

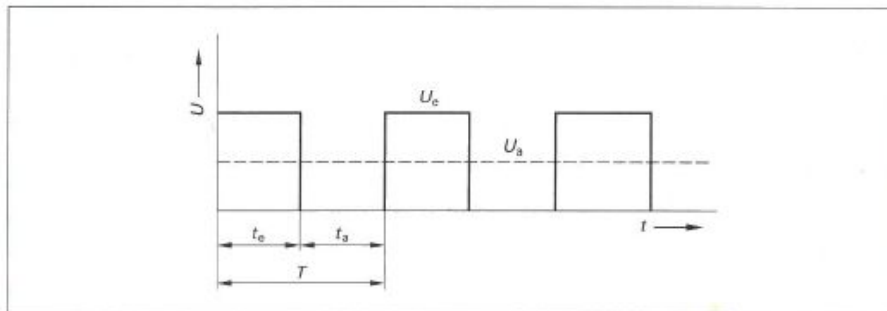


Abbildung 18: Spannungsverlauf Gleichstrom-Steller¹⁰²

Es gilt:

$$(1) U_a = \frac{U_e * t_e}{T}$$

Formel 23: Ausgangsspannung am Gleichstromsteller¹⁰³

„Während der Schalter geschlossen ist, fließt ein Strom mit einem Mittelwert (unter der Annahme einer verlustfreien Schaltung):“¹⁰⁴

¹⁰⁰ Gressmann / Müller, 2013, S.87

¹⁰¹ Ebd.

¹⁰² Ebd.

¹⁰³ Ebd., S.88

¹⁰⁴ Ebd.

$$(2) I_e = \frac{I_a * t_e}{T}$$

Formel 24: Eingangsstrom am Gleichstromsteller¹⁰⁵

„Mit dem Tastverhältnis t_e/T lassen sich Spannung und Strom einstellen. Gleichung (2) sagt aus, dass der Ausgangsstrom des Gleichstromstellers immer größer als der Eingangsstrom ist. Nur im Falle eines ständig geschlossenen Schalters ($t_e = T$) ist der Motorstrom gleich dem Batteriestrom.

Der Gleichstrom-Steller wirkt wie ein klassischer Transformator, bei der die Eingangsspannung sich auf ein anderes Spannungsniveau transformieren lässt. Unter der Voraussetzung, dass die Leistungsabgabe der aufgenommenen Leistung entspricht (verlustfreier Transformator), gilt die Gleichung:¹⁰⁶

$$U_e * I_e = U_a * I_a$$

Formel 25: Verlustfreier Transformator¹⁰⁷

„Mit einem Gleichstromsteller lassen sich sowohl Gleichspannungen wie Gleichströme umwandeln.“¹⁰⁸

Einen weiteren wichtigen Part übernimmt der Drehstromsteller, der die Aufgabe hat den von der Batterie gelieferten Gleichstrom mittels einer Drehstrombrücke so zu schalten, dass die jeweils benötigte Spule der Ständerwicklung stromdurchflossen ist. Hierzu werden sechs Leistungstransistoren benötigt, welche die Wicklungen beinahe verlustfrei unter Spannung setzen.¹⁰⁹

Die folgende Tabelle und das dazugehörige Bild zeigen das Schaltmuster der MOSFETs, um in den Statorwicklungen ein drehendes Magnetfeld zu erzeugen und welche Wicklungen im Stator zum jeweiligen Zeitpunkt an der Plus- (rot) bzw. Minusleitung (blau) liegen.¹¹⁰

¹⁰⁵ Gressmann / Müller, 2013, S.88

¹⁰⁶ Ebd.

¹⁰⁷ Ebd.

¹⁰⁸ Ebd.

¹⁰⁹ Vgl. Ebd., S.91

¹¹⁰ Vgl. Ebd., S.92

	Schaltzustand der Drehstrom-Brücke						Stromfluss in Wicklung		
Phase	T1	T2	T3	T4	T5	T6	L1	L2	L3
I	Ein			Ein		Ein	+I	-I	-I
II	Ein		Ein			Ein	+I	+I	-I
III		Ein	Ein			Ein	-I	+I	-I
IV		Ein	Ein		Ein		-I	+I	+I
V		Ein		Ein	Ein		-I	-I	+I
VI	Ein			Ein	Ein		+I	-I	+I

Tabelle 5: Zündschema zum Ansteuern der Leistungshalbleiter T1 bis T6¹¹¹

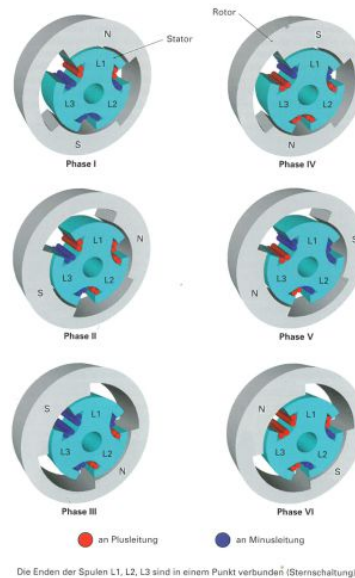


Abbildung 19: Schema eines Drehstrommotors¹¹²

Für die Steuerung des Mars ME0913 wurde eine Steuereinheit von Kelly Controls gewählt. Der Controller KHB 12601 ist ein programmierbarer Controller für bürstenlose Elektromotoren, grundsätzlich kann er Spannungen der Traktionsbatterie zwischen 12 V – 136 V verarbeiten. Der kontinuierliche Nennstrom, der dem Motor bereitgestellt werden kann, liegt bei 300 A, für 1 min ist er auch in der Lage 600 A zu verarbeiten. Ein weiterer wichtiger Aspekt für den Entschluss für diesen Controller war auch, dass er in der Lage ist, elektrisch zu bremsen und dabei die Traktionsbatterie zu laden.

Da der KHB 12601 eine Betriebsspannung zwischen 10 V und 30 V benötigt, ist es möglich, ihn mit einer Motorradbatterie zu versorgen, wodurch der Antriebs-Akku nicht zur Speisung verwendet werden muss.¹¹³

¹¹¹ Gressmann / Müller, 2013, S. 92

¹¹² Ebd., S. 93

¹¹³ Vgl. http://kellycontroller.com/mot/downloads/KellyKHB_HPUserManual.pdf (Stand: 27.10.2016), S. 3-5

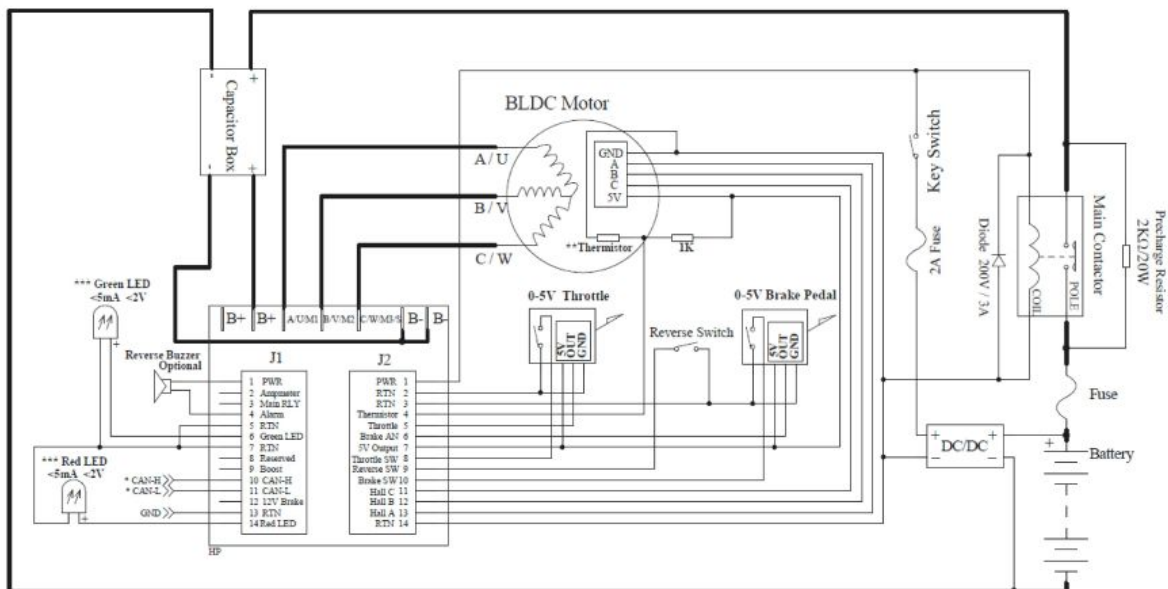


Abbildung 20: Anschlussschema Controller¹¹⁴

2.3 Auswahl der zum Betrieb benötigten Sekundärkomponenten

Damit der Antrieb überhaupt funktioniert, werden noch einige Komponenten benötigt. Diese Elemente wurden als Sekundärkomponenten bezeichnet.

2.3.1 Auswahl des Regelorgans

Der Motorcontroller benötigt ein Regelorgan, über welches der Fahrer dem Controller „mitteilen“ kann, ob er beschleunigen, bremsen oder er konstant fahren will. Für den KHB 12601 können zwei verschiedene Arten von Regelorganen verwendet werden. Die Informationen können entweder mittels Potentiometer oder mittels Hallensensor weitergegeben werden.¹¹⁵

Da eine hohe Qualität und eine spätere Ersatzteilversorgung Priorität haben, wurde entschieden, den Magura Gasdrehgriff 317 zu verwenden. Dieser arbeitet als Drehpotentiometer und ist zwar kostspieliger als die no-name Produkte aus dem

¹¹⁴ Vgl. http://kellycontroller.com/mot/downloads/KellyKHB_HPUserManual.pdf (Stand: 27.10.2016), S.16

¹¹⁵ Vgl. Ebd

Internet, dafür sollten die vorher genannten Merkmale kein Problem sein. Das dreiadrige Potentiometer besitzt einen Regelbereich zwischen 0 – 5 k Ω .¹¹⁶

2.3.2 Auswahl des Batterie-Management-Systems

Die grundlegende Aufgabe eines Batteriemanagementsystems (BMS) ist es, sicherzustellen, dass die Batterieenergie, die das Fahrzeug versorgt, optimal genutzt wird und die Gefahr der Beschädigung der Batterie minimiert wird. Dies wird durch Überwachung und Steuerung des Lade- und Entladeprozesses der Batterie erreicht.¹¹⁷

Auch die thermische Kontrolle spielt bei Fahrzeuganwendungen eine Rolle. Hierbei wird die Zelltemperatur ständig gemessen und bei Bedarf werden hier die Zellen beheizt oder gekühlt.

Bei den Recherchen im Internet wurde herausgefunden, dass bei vielen der Antriebsumbauten gänzlich auf ein Batterie-Management-System verzichtet wurde.

Da aber eine Überwachung der Zellen von Vorteil ist wurde beschlossen ein BMS zu erwerben, welches über kein Thermisches-Management verfügt, aber die einzelnen Zellenspannungen und die Stromabgabe ständig überwacht. Die Wahl fiel auf Gamber-BMS, einer kanadischen Manufaktur. Tim Gamber hat dieses System entwickelt und verwendet es selbst bei seinem Umbau. Dieses System besteht aus der Hauptkontrolleinheit, Zellenmodulen für jede Zelle, einer Strommessung und einem Display mit Tastern für diverse Einstellungen. Über das Display können die Anzahl der Zellen, die Ober- und Untergrenze der Batteriespannung und die Spannung mit der die Zellen balanciert werden sollen, eingestellt werden.¹¹⁸

Jedes Zellenmodul verfügt über eine eigene Adresse und kommuniziert mit der Hauptkontrolleinheit. Die Module werden nacheinander abgefragt und die jeweilige

¹¹⁶ Vgl. <http://www.motorradparts24.de/fahrgestell2/lenkung/lenkerarmaturen/gasgriff-komplett-modell-317-magura/a-5137571/> (Stand 27.10.2016)

¹¹⁷ Vgl. Bergveld / Kruijtit / Notten; 2002; S.3

¹¹⁸ Vgl. www.GamberBMS.com (Stand: 18.02.2014); S.20 - 23

Zellenspannung ist am Display ersichtlich, genauso wie der momentane Stromverbrauch.¹¹⁹

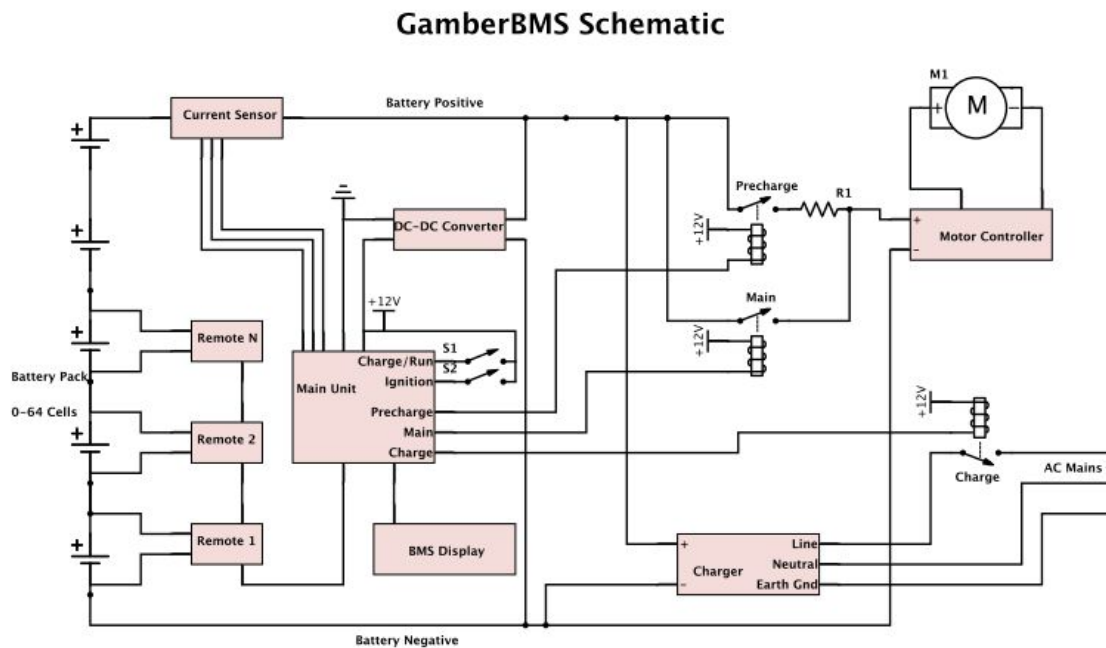


Abbildung 21: Schaltschema Gamber BMS¹²⁰

>

¹¹⁹ Vgl. www.GamberBMS.com (Stand: 18.02.2014); S. 3 - 15

¹²⁰ Ebd.; S. 16

3 Chassis und Verkleidung

Dieses Kapitel behandelt das Thema des Spendermotorrades. Von der Auswahl über den Kauf, der Instandsetzung und Aufbereitung defekter Teile bis zum neuen Design.

3.1 Auswahl des geeigneten Spendermotorrades

Abgesehen vom gewünschten Modell erfolgte die Auswahl des zu konvertierenden Motorrades unter folgenden Kriterien:

- Zulässiges Gesamtgewicht
- Vollverkleidet
- Rahmen
- Preis
- Marktsituation
- Allgemeinzustand

3.1.1 Das zulässige Gesamtgewicht

Durch das hohe Batteriegewicht sollte das Motorrad ein, den Umständen entsprechendes, hohes Eigengewicht aufweisen, damit nach dem Umbau das Eigengewicht in etwa gleich ist bzw. nur geringfügig überschritten wird. Außerdem sollten gewisse Reserven im zulässigen Gesamtgewicht bestehen bleiben, damit das Fahrwerk und die Bremsen nicht ständig zu hohen Beanspruchungen ausgesetzt werden, wodurch sich der Verschleiß erhöhen würde.

3.1.2 Motorrad mit Vollverkleidung

Die Wahl eines vollverkleideten Motorrades fällt hauptsächlich auf den cw-Wert zurück, welcher den Windwiderstand im hohen Maße beeinflusst. Als positiver Nebeneffekt sei zu erwähnen, dass durch die Verkleidung der Umbau als solcher

nicht sofort zu erkennen ist, da die ursprüngliche Form des Motorrades beibehalten wird.

3.1.3 Die Bauart des Rahmens

Sehr wichtig für einen Umbau ist die Bauart des Rahmens, sie bestimmt wie viel Platz für die Antriebskomponenten zur Verfügung steht und ob dadurch eine günstige Gewichtsverteilung mit möglichst niedrigem Schwerpunkt ermöglicht werden kann. Außerdem sollten genügend Montagepunkte für die oben genannten Komponenten vorhanden sein.

3.1.4 Der Preis des Spendermotorrades

Ein Hauptargument für den Kauf eines Basismotorrades ist der Preis. Baujahrbezogen treten hier große Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen auf. In diesem Fall sollte man nach Geschmack und Angebot entscheiden.

Wenn man zum Beispiel die einzelnen Motorräder eines Segments, in diesem Fall „Sporttourer“, aus den frühen 1990er Jahren betrachtet, ist das Preisniveau sehr marken- und typenabhängig. Obwohl die Unterschiede beim Handling zwischen den einzelnen Modellen bei den damaligen Tests und Vergleichen nicht gravierend waren. Durch den Umbau auf Elektroantrieb verschiebt sich die Balance des Fahrzeuges und somit ändern sich die Fahreigenschaften, wodurch wiederum die damaligen Tests in Punkto Handling hinfällig sind.

3.1.5 Der Allgemeinzustand

Eines der wichtigsten Kriterien für den Verkaufspreis ist der Allgemeinzustand. Hier sollte beachtet werden, dass die Bremsen ordnungsgemäß funktionieren, die Bremsklötze und –scheiben nicht verschlissen sind, die Bremsleitungen nicht porös und im Allgemeinen keine Undichtigkeiten im Bremssystem vorliegen. Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass sowohl die Handbremspumpe als auch die Fußbremspumpe einwandfrei funktionieren.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Fahrwerk. Vor allem Leckagen an den Federelementen können bei einer späteren Instandsetzung den Zeit- bzw. Kostenaufwand unnötig erhöhen.

Zusätzlich sollten sämtliche Lager genauer betrachtet werden. Betroffen sind hier folgende Lager:

- Radlager vorne und hinten
- Lenkkopflager
- Schwingenlager

Wobei zu bemerken ist, dass das Schwingenlager und die Lager der Schwingenumlenkung bei einer Besichtigung eher schwer bis gar nicht geprüft werden können, außer sie wären schon vollkommen defekt. In solch einem Fall wäre von einem Kauf abzuraten.

Das Allerwichtigste ist aber der Rahmen selbst. Sollte dieser durch einen Sturz verformt worden sein, ist ein Kauf nicht empfehlenswert.

3.2 Kauf des Motorrades

Letztendlich wurde eine Yamaha FZR 500, Baujahr 1991 erworben. Das Motorrad wies einige Gebrauchsspuren auf und die Vergaser waren verklebt, sodass sich der Motor zwar starten lies, aber sehr unruhig lief und sofort ausging sobald eine Stellungsänderung am Gasdrehgriff vorgenommen wurde. Da der Motor aber als Ersatzteilsponder verkauft werden sollte, war dies egal.



Abbildung 22: Yamaha FZR 500 nach dem Kauf

3.3 Bestandsaufnahme am Chassis, der Beleuchtung und der Verkleidung

Gleich nach dem Kauf wurde das Motorrad vom Verbrennungsmotor und der dazugehörigen Peripherie befreit.

3.3.1 Ausbau des Verbrennungsmotors und der zukünftig unnötigen Teile

Dazu wurden zuerst die seitlichen Verkleidungen abgenommen und das Motorrad aufgebockt. Danach die Sitzbank, die Tankverkleidung und die hinteren Abdeckungen. Anschließend wurden die Airbox und der Tank entfernt. Die Betriebsflüssigkeiten wie Kühlwasser, Motoröl und der in der Vergaserbatterie verbliebene Sprit wurden abgelassen und ordnungsgemäß entsorgt. Nun konnten die Auspuffanlage und der Kühler abgenommen werden, die Vergaserseilzüge am Vergaser abmontiert und alles vorbereitet werden, um den Rahmen vom Motor zu befreien. Dazu wurde ein großer Wagenheber unter dem Motor platziert, alle notwendigen Schraubverbindungen gelockert, alle angeschlossenen Kabel abgesteckt und nach und nach alle Schrauben entfernt bis der Motor nicht mehr mit dem Rahmen verbunden war. Anschließend konnte auf einer Seite der Hilfsrahmen abgenommen werden und der Wagenheber mit dem darauf liegenden Motor herausgezogen werden. Danach wurden alle Scheinwerfer und der Hauptkabelstrang demontiert. Somit blieb nur noch das rollende Chassis übrig.



Abbildung 23: rollendes Chassis

3.3.2 Überprüfung der Bremsanlage, des Fahrwerks, der einzelnen Lager und des Rahmens

Beim Reinigen des Rahmens kamen einige unschöne Dinge zum Vorschein, wodurch eine weitere Behandlung des Rahmens erforderlich wurde. Dem Vorbesitzer war die Batterie übergelaufen und die Batteriesäure hatte die Kunststoffbeschichtung des Rahmens zerfressen und das Metall angegriffen. Dies war bei der Kaufbesichtigung leider nicht ersichtlich. Auch die Felgen hatten Stellen, an denen die Beschichtung abgeschlagen war und das Aluminium darunter oxidierte. Somit wurde beschlossen, dass der Rahmen und die Felgen entlackt, sandgestrahlt und pulverbeschichtet werden sollten.

Mit dieser Entscheidung ergab sich, dass die Lenkkopflagerung, die Radlager und die Lagerung der Schwinge erneuert wurden, da die eingebauten Lager für die oben genannten Prozesse ausgepresst werden mussten.

Bei der genauen Betrachtung der Bremsen wurde festgestellt, dass die rechte vordere Bremszange Undichtigkeiten aufwies und hier die Bremsbeläge von der Bremsflüssigkeit schon angegriffen waren. Deshalb wurden die zwei vorderen und die hintere Bremszange neu abgedichtet und mit neuen Bremsbelägen bestückt. Die Bremsscheiben waren noch unterhalb der Verschleißgrenze und konnten wieder verwendet werden.

Das Federbein machte nach der Reinigung einen guten Eindruck, konnte ohne weitere Behandlung wiederverwendet werden. Nach einem Gespräch mit einem Motorrad-Kfz-Meister stand fest, dass die Federgabel aufgrund des Alters revidiert werden sollte und da nun mit einer erhöhten Gewichtsbelastung am Vorderad durch die Traktionsbatterie gerechnet werden konnte, empfahl er auch die Menge des Dämpfungsöls in den Gabelholmen etwas zu erhöhen.

3.4 Instandsetzung der defekten Teile und Aufbereiten der Optik

Bevor es an die Restaurierung der defekten Teile ging, wurden das Batterierack und die Motorplatte an die Gegebenheiten des Rahmens und die vorhandenen

Montagepunkte angepasst. Diese Schritte werden im Kapitel Konstruktion genauer erörtert.

Wie oben beschrieben, wurden alle Rahmenteile gereinigt, die vorhandenen Lager ausgepresst und anschließend alles dem Pulverbeschichter übergeben. Gleichzeitig wurden alle zu erneuernden Teile bestellt. Nach dem Erhalt der Ersatzteile wurden die gereinigten Bremszangen zerlegt und alle Dichtungen durch neue ersetzt.

Alle benötigten Kunststoff- und Anbauteile wurden gründlich gereinigt und soweit möglich, aufbereitet. Die Federgabel wurde zerlegt, gereinigt, mit neuen Dichtringen bestückt, zusammengebaut und nach Vorgabe des Kfz-Meisters mit Feder-gabelöl befüllt.

Nach Erhalt der pulverbeschichteten Teile wurden die neuen Lager vorsichtig, ohne die neue Beschichtung zu verletzen, wieder eingepresst.

Nach dem Einpressen der Lager und der Montage neuer Reifen konnte das Chassis zusammengebaut und wieder mit der Bremsanlage bestückt werden.



Abbildung 24: pulverbeschichtetes Chassis

Nun wurden der Kabelstrang, alle Scheinwerfer und die benötigten Kunststoffteile wieder am Chassis montiert. Somit war das Motorrad vom Chassis her soweit komplettiert, dass das neue Antriebssystem eingebaut werden konnte.

3.5 Das Chassis soweit fertig stellen, sodass es die §57A Überprüfung besteht.

Dies bedeutet, dass das Motorrad technisch soweit in Ordnung sein muss, dass es die jährliche Überprüfung der Verkehrstauglichkeit besteht.

Dazu müssen folgende Forderungen erfüllt werden:

- Die Reifen müssen genug Profil besitzen und sollten nicht älter als 5 Jahre sein.
- Die Bremsbeläge und -scheiben müssen sich unterhalb der Verschleißgrenze befinden und die Bremsflüssigkeit muss jährlich erneuert werden.
- Der Rahmen muss rostfrei, darf nicht verzogen und nicht geschweißt worden sein.
- Jegliche Lagerungen mechanischer Teile, wie Rad-, Lenkkopf- und Schwingenlager dürfen kein Spiel aufweisen.
- Beim Kettenantrieb sollen weder das Ritzel noch das Kettenrad verschlissen sein, außerdem darf die Kette nicht gelängt sein.

Bis auf den Kettenantrieb wurden alle Forderungen erfüllt. Das Kettenrad wurde beim Zusammenbau des Hinterrades gereinigt und auf Verschleiß geprüft. Der Kettenantrieb konnte erst nach dem Einbau des Motors und des Antriebsritzels vernünftig fertiggestellt werden.

3.6 Bestimmen des Designs durch neue Farbgebung

Um das Motorrad vom Design her etwas abzuheben, wurde beschlossen, die Felgen weiß, den Rahmen und dessen Anbauteile grau pulverbeschichten zu lassen. Die bereits von einem Vorbesitzer schwarz lackierten Verkleidungsteile sollen nach allen bestandenen Tests in hellem rot lackiert werden. Diese Farbkombination von Rahmen und Verkleidung fand ihre Inspiration in einem Flughafenlöschfahrzeug der Firma Rosenbauer¹²¹.

¹²¹ Vgl. <http://www.rosenbauer.com/de/at/world/fahrzeuge/flughafenloeschfahrzeuge/panther.html>, (Stand: 10.12.2016)

4 Konstruktion aller benötigten Halterungen

Dieses Kapitel beschreibt die Konstruktion aller benötigten Halter und deren Positionierung im Chassis.

4.1 Vorplanung der Positionierung aller Komponenten im Rahmen

Mit diesem Schritt konnte sofort nach dem Strippen des Motorrades begonnen werden. Nach dem Ausbau des Verbrennungsmotors und der nicht mehr benötigten Peripherie wurden alle zur Verfügung stehenden Montagepunkte aufgenommen, die Platzverhältnisse ausgemessen und dies auf Skizzen festgehalten. Anschließend wurden mit den Datenblättern aller Bauteile Kartonmodelle von Motor und von ein bis sechs Zellen erstellt und versucht, diese annähernd so im Rahmen zu platzieren, wie sie später in Wirklichkeit angebracht werden sollten. Gleichzeitig wurden zuerst mit dem CAD-Programm „Autodesk Autocad“ die Motorhalterung und das Batterierack skizziert und immer wieder mit den Kartonmodellen im Rahmen verglichen.

Die erste ernsthafte Variante des Batterieracks musste umgeändert werden, da beim Einfedern das Vorderrad auf die Halterung gedrückt hätte.

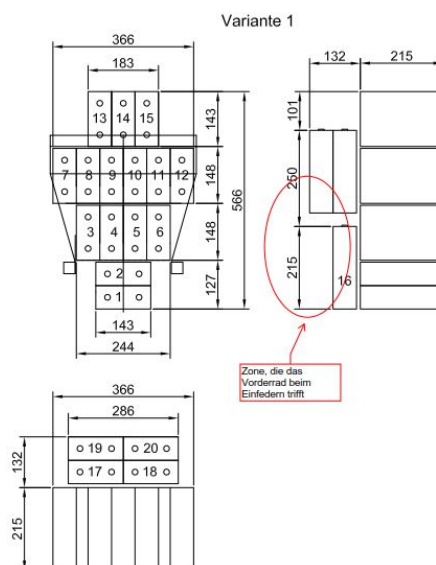


Abbildung 25: erste Variante der Zellenplatzierung

Vorerst wurde eine dünnere Platte für eine provisorische Motorhalterung verwendet, damit der Motor im Rahmen montiert werden konnte.

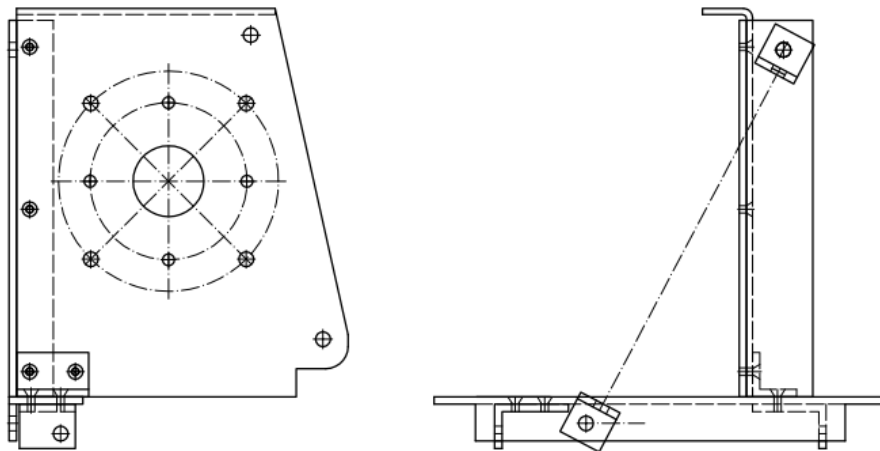


Abbildung 26: vorläufige Motorhalterung

Nachdem der Motorplatzbedarf durch die Halterung fixiert war, konnte die Zellenanordnung endgültig bestimmt werden.

4.2 Konstruktion und Bau des Batterieracks

Aufgrund der Platzverhältnisse ergab es sich, dass nur 22 Zellen im Batterierack Platz fanden. Bei der endgültigen Version befinden sich 18 Zellen im Hauptrahmen und 4 Zellen werden an einer Erweiterung über dem Motor platziert.

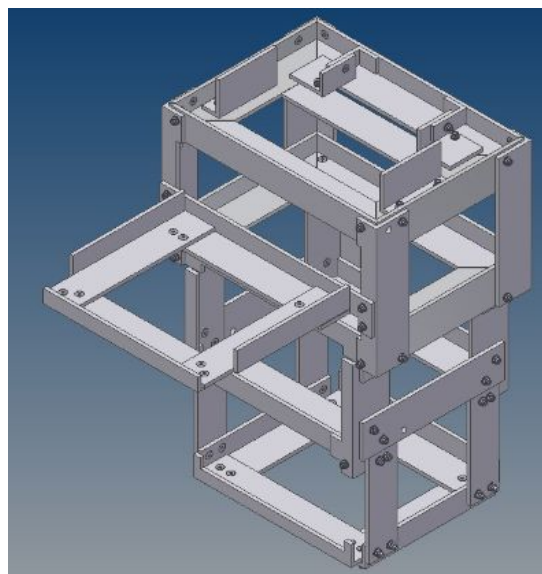


Abbildung 27: Batterierahmen in der CAD-Planung



Abbildung 28: Bestücktes Batterierack verbaut im Chassis

Der Hauptrahmen wird an vier Montagepunkten am Rahmen befestigt. Die Erweiterung wird an einer Seite am Hauptrahmen verschraubt und auf der anderen Seite mit der Motorplatte.

4.2.1 Auswahl der Profile und Schrauben

Das Batterierack musste so gebaut werden, dass jederzeit eine defekte Zelle ausgebaut und ersetzt werden kann. Aus diesem Grund kam nur eine geschraubte Variante in Frage. Umso platzsparend wie möglich bauen zu können, wurden Senkkopfschrauben verwendet. Dadurch konnte die Konstruktion so gebaut werden, dass kein Platz für Schraubenköpfe benötigt wurde und im Bereich der Zellen nur ebene Flächen vorhanden sind. Bei der Durchsicht der Tabelle „TB 8-9 Konstruktionsmaße für Verbindungen mit Zylinder- und Senkschrauben“¹²² wurde beschlossen, DIN 7991 M5 Senkkopfschrauben mit DIN 125 Beilagscheiben und DIN 985 Muttern mit Klemmteil aus Polyamid für diesen Zweck zu verwenden. An den vorhandenen Montagepunkten des Rahmens waren bereits M8 Schraubenlöcher vorhanden, wodurch nur M8 Schrauben Verwendung fanden. Um Aluminiumfraß zu vermeiden, wurden die Schrauben und deren Zubehör aus dem Material A2 verwendet.

¹²² Vgl. Matek / Muhs / Wittel / Becker, 2001, S. 82 bis 83

Bei den Profilen wurde entschieden, stranggepresste Aluminiumprofile aus dem Material EN AW-6060 zu verwenden. Um bei den Senkungen genügend Restklemmmaterial sicherzustellen und trotzdem so dünnwandig wie möglich zu bleiben, wurde beschlossen, 5mm starke Profile in Form von T-50x50x5 und L-50x30x5 zu verwenden.

Die groben Überprüfungen der Profile als auch der Schrauben erfolgte nach den Kapiteln „3 Festigkeitsberechnung“¹²³ und „8 Schraubenverbindungen“¹²⁴ aus dem Buch „Rollof / Matek Maschinenelemente“ 15. Auflage.

Bei den Profilen ergab diese Überprüfung in etwa jeweils eine 3%-ige Ausnutzung bei der Durchbiegung.

Die Überprüfung zur Übertragung von Querkraft der Schraubenverbindungen ergab bei den M5 Schrauben eine Sicherheit von ca. 2,5 und bei den M8 Schrauben eine Sicherheit von über 3.

4.2.2 Konstruktion des Batterierahmens mit CAD

Mit Hilfe des 3D-CAD Programms „Autodesk Inventor“ konnte der Batterierahmen anhand der angefertigten Skizzen und Abmessungen dreidimensional konstruiert werden. Wobei durch die Konstruktion am Computer mehrmals bessere Lösungsmöglichkeiten bei der Verbindung der einzelnen Konstruktionsteile gefunden werden konnten.

Auch während des Rahmenbaus wurden immer wieder die tatsächlichen Maße und anfallenden Platzverhältnisse mit dem 3D-Modell abgeglichen und eingearbeitet.

Durch die Konstruktion mit Inventor konnte der Verschnitt bei den Profilen so gering wie möglich gehalten werden.

¹²³ Vgl. Matek / Muhs / Wittel, 2001, S.37 bis 69

¹²⁴ Vgl. Ebd., S.194 bis 250

4.3 Konstruktion und Fertigung der Motorplatte

Mit Hilfe der Abmessungen aus dem Motordatenblatt

„ME0913_Dimension“¹²⁵ konnte zuerst ein Kartonmodell vom Motor erstellt werden und dieses wurde mit Klebeband am Motorradrahmen so platziert, dass die Motorwelle des Elektromotors in etwa die gleiche Position wie vorher die Antriebswelle des Verbrennungsmotors, einnahm. Danach wurde eine Kartonplatte so zugeschnitten, dass sie die vorhandenen Montagepunkte des Verbrennungsmotors und das Kartonmodell des neuen Motors einschloss. Dadurch konnten die Montagepunkte auf den Karton übertragen werden.

4.3.1 Konstruktion der vorläufigen Motorplatte mit CAD Unterstützung

Mit Hilfe des CAD-Programms „Autodesk Autocad“ wurde eine Skizze mit den Abmessungen der Kartonplatte, den Bohrlöchern für die Montagepunkte und den Bohrlöchern zur Montage des Elektromotors erstellt. Diese Skizze wurde im Maßstab 1:1 ausgedruckt. Mit dem ersten Ausdruck wurde wiederum ein Stück Karton beklebt. Durch die Skizze konnte die Form der künftigen Platte zugeschnitten und die benötigten Löcher ausgeschnitten werden. Mit diesem Stück Karton wurde kontrolliert, ob die Bohrungen für die bestehenden Montagepunkte richtig platziert waren und ob sich der Motor in der richtigen Position befand. Bei diesem Vergleich wurde festgestellt, dass der Motor noch etwas gedreht werden musste, damit die Motoranschlüsse im verbauten Zustand noch gut zu erreichen sind. Nach dem wiederholten Vorgehen der vorher beschriebenen Arbeitsschritte stand fest, dass die Größe der Motorplatte und die angedachten Bohrungen passten. Anschließend wurde aus einer 4mm starken Edelstahlplatte, Aluminium L-Profilen und M10 Gewindestangen mit dazugehörigen Muttern eine provisorische Motorhalterung gebaut, um die vorhandenen Platzverhältnisse für das Batterierack und die benötigten Anschlusskabel zu finalisieren. Bei der oberen Befestigungsposition wurde zur Befestigung am Motorradrahmen eine Gewindestange mit

¹²⁵ Vgl. http://kellycontroller.com/mot/downloads/ME0913_Dimension.pdf, (Stand: 05.01.2017)

mehreren Muttern verwendet. Mit Hilfe der Muttern konnte die Position der Platte genau eingestellt werden. Bei der unteren Befestigungsposition konnte die Platte direkt mit dem Rahmen verschraubt werden. Damit die Halterung besser eingerichtet und anschließend fixiert werden konnte, wurde eine Konstruktion erdacht, welche die Motorplatte mit dem Hilfsrahmen verbindet. Es konnten so auch die Gegebenheiten für den Kettenantrieb kontrolliert werden. Diese Behelfsplatte legte den Grundstein für die endgültige Motorhalterung.

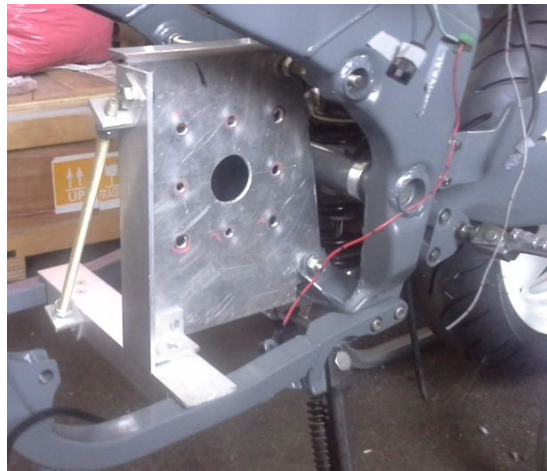


Abbildung 29: Provisorische Motorplatte eingebaut im Rahmen

4.3.2 Endgültige Konstruktion der Motorplatte mit CAD und FEM Unterstützung

Zuerst wurde mit Hilfe der 2D-Zeichnungen der provisorischen Motorplatte ein 3D-Modell erstellt. Hierfür wurde die Annahme getroffen, dass eine 10 mm dicke Aluminiumplatte stark genug sein sollte, die auftretenden Kräfte aufnehmen zu können. Die Grundform entsprach genau der Vorlage, nur die Plattenstärke wurde geändert und das Flanschbild des Motors konnte eingearbeitet werden. Dieses 3D-Modell wurde in den Formaten IGES und STEP abgespeichert, um diese anschließend in das FEM Programm „Ansys“ einlesen zu können.

Nachdem die STEP-Datei erkannt wurde, konnten die Belastungen und Randbedingungen der Berechnung gesetzt werden. Hierfür wurden das Eigengewicht des Motors, die auftretenden Kräfte und Momente vom Kettenantrieb und die Lagerung der Platte berücksichtigt. Um ein mögliches Auslen-

ken der Platte zu vermeiden, wurde auch die vordere, seitliche Abstrebung der Platte simuliert. Für die Berechnung wurde ein maximales Drehmoment des Motors von 90 Nm angenommen.

Die Analyse ergab eine maximale Verformung der Platte von $0,07 \text{ mm}$ und eine maximale Vergleichsspannung von $62,31 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

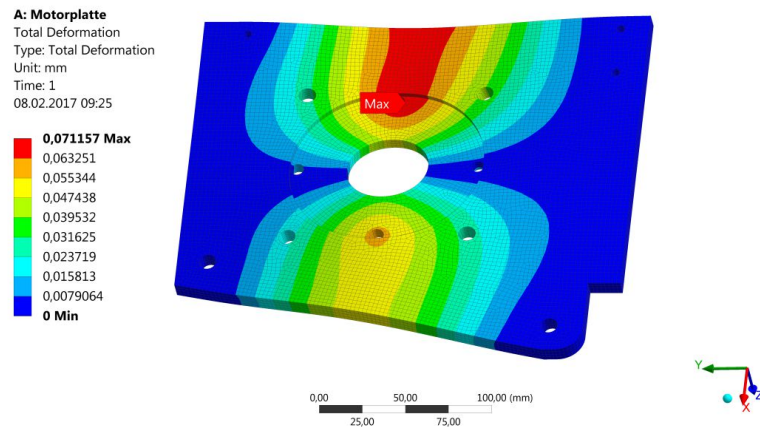


Abbildung 30: maximale Verformung der Motorplatte

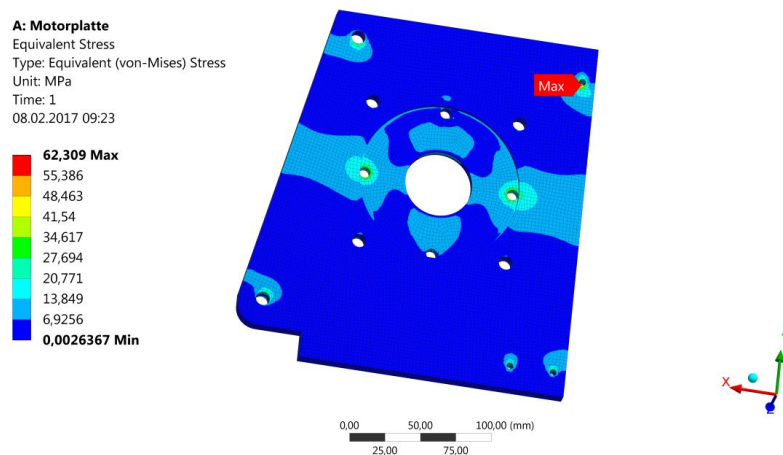


Abbildung 31: maximale Vergleichsspannung

Diese maximale Spannung tritt aufgrund der gesetzten Randbedingung genau am scharfkantigen Übergang der gedachten Einspannung auf. Da die maximale Vergleichsspannung aber die maximal zulässige Spannung von $80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für den Werkstoff EN AW 6060 T6¹²⁶ nicht überschreitet und die

¹²⁶ Vgl. <http://www.aluinfo.de/download.html?id=16> (Stand: 30.12.2016), S4

Spannungsspitzen durch das Einspannen der Platte an den Schraubenlöchern hervorgerufen wird. Wurde beschlossen die Motorhalterung so fertigen zu lassen, wie sie im FEM-Model betrachtet wurde.

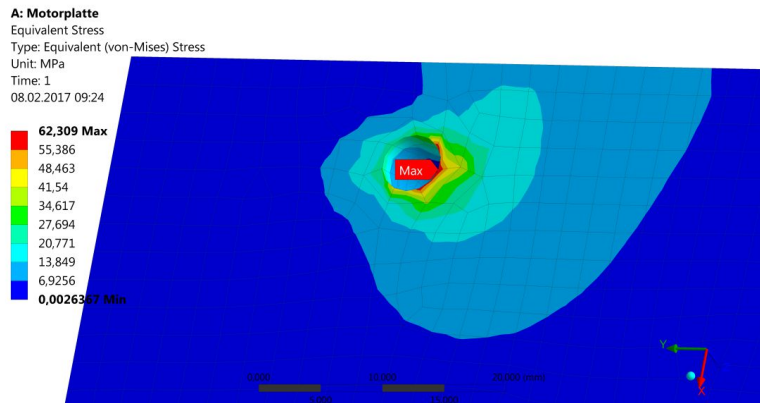


Abbildung 32: Detailansicht der Bohrung mit der höchsten Belastung

4.3.3 Fertigung der Motorplatte

Das endgültige Material der Motorplatte ergab sich durch das Angebot des Laserschneidebetriebs. Das Werkstück wurde aus EN AW-5083 gefertigt, welches eine Streckgrenze von $110 \frac{N}{mm^2}$ aufweist. Beim Laserschneiden konnte die Kontur und alle Bohrungen bis 10 mm geschnitten werden. Die kleineren Bohrungen wurden mit einer CNC-Bohrmaschine erstellt und die Motorzentrierung wurde ausgedreht.

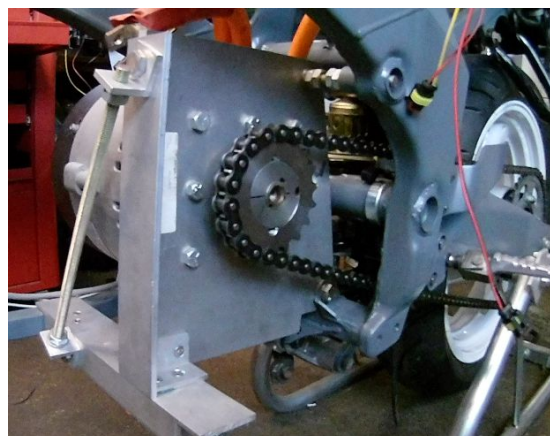


Abbildung 33: Positionierung Motorplatte mit Kettenrad

4.4 Bau der Halterung des Motorcontrollers, des Hauptrelais und des BMS

Der Motorcontroller wurde so platziert, dass er schräg über den Zellen der Batterierackerweiterung montiert werden konnte. Durch diese schräge Anordnung war es möglich, das Hauptrelais unterhalb des Controllers zu montieren. Die Halterung besteht aus einer 4mm Edelstahlplatte, welche in der Größe des Controllers zugeschnitten wurde. Das Hauptrelais konnte mit zwei M5 Senkkopfschrauben auf der Unterseite der Platte befestigt werden. Des Weiteren wurden vier Aluminiumwinkel angefertigt und auf der Unterseite befestigt. Der Controller wurde mit sechs M5 Schrauben angeschraubt. Seitens des Motorradrahmens wurden an den vorhandenen Montagepunkten wiederum vier Aluminiumwinkel angepasst. Eine M10-Gewindestange sorgt auf der oberen Seite für die Verbindung zwischen Motorradrahmen und Controllerhalterung. Mit Hilfe mehrerer Muttern kann die Platte zentriert und geklemmt werden. Auf der unteren Seite der Halterung konnten die Winkel am Motorradrahmen und auf der Platte so platziert werden, dass sie miteinander mittels M8-Schrauben verbunden werden konnten.

Die einzelnen Zellenmodule des BMS und die Steuereinheit wurden mit doppelseitigem Klebeband auf eine Acrylglasplatte geklebt. Diese Plexiglasplatte wurde mit einem 1,5 cm starken Schaumgummi-Dichtungsband auf den Controller geklebt.



Abbildung 34: Controllerplatte mit Hauptrelais und BMS

Diese Positionierung der Komponenten ermöglicht es die Verkabelung so kompakt wie möglich zu halten und die vorhandene Tankverkleidung wieder zu verwenden, wodurch das ursprüngliche Design des Motorrades erhalten blieb.

4.5 Auswahl der Getriebekomponenten

Die Verbrenner-Version der Yamaha benutzte einen Kettenantrieb mit einer 530 Kette mit einem Kettenrad mit 49 Zähnen am Hinterrad. Diese Art von Kette wird auch für Motorräder mit größeren Hubräumen verwendet. Zum Beispiel bei einer Aprilia SL 1000 Falco. Bei diesem Motorrad muss die Kette eine Leistung von 87 kW und ein Drehmoment von 96 Nm übertragen.¹²⁷ Aufgrund dieser Daten wurde entschieden, dass diese Art von Kette weiterverwendet werden sollte, wodurch das vorhandene Kettenrad wieder genutzt werden konnte.

Die Kettenbezeichnung 530 bezieht sich auf die Hauptabmessungen der Kette. Anbei eine Tabelle mit den Hauptabmessungen gängiger Motorradketten.

Kettenbezeichnung		Bolzenabstand (T)		Kettenbreite (B)		Rollen (D)
Neu	Alt	Zoll	mm	Zoll	mm	mm
415	1/2 x 3/16	1/2"	12,70	3/16"	4,00	7,75
420	1/2 x 1/4	1/2"	12,70	1/4"	6,35	7,75
420	1/2 x 1/4	1/2"	12,70	1/4"	6,35	8,51
428	1/2 x 5/16	1/2"	12,70	5/16"	7,94	8,51
520	5/8 x 1/4	5/8"	15,88	1/4"	6,35	10,16
525	5/8 x 5/16	5/8"	15,88	5/16"	7,94	10,16
530	5/8 x 3/8	5/8"	15,88	3/8"	9,53	10,16
532	5/8 x 3/8	5/8"	15,88	3/8"	9,53	11,10
630	3/4 x 3/8	3/4"	19,05	3/8"	9,53	11,96
632	3/4 x 3/8	3/4"	19,05	3/8"	9,53	12,07

Tabelle 6: Kettenbezeichnungen und Abmessungen¹²⁸

Die Abmessungen einer 530 Motorradkette entsprechen denen einer Rollen- kette 10 B-1 nach DIN8187. Somit konnte für das benötigte Ritzel ein Norm- Kettenrad genutzt werden.

¹²⁷ Vgl. <http://www.motorradonline.de/gebrauchte-motorraeder/gebraucht-markt-aprilia-sl-1000-falco.341170.html>, (Stand: 07.01.2017)

¹²⁸ http://www.gs-classic.de/technik/tech_kette01.htm, (Stand: 07.01.2017)

Die Verbindung des Ritzels mit der Motorwelle erfolgt über eine Taper-Spannbuchse mit Passfeder. Um bei der Übersetzung eine zum Motor passende Variante wählen zu können, wurde eine Spannbuchse in der Größe 1610 besorgt und mehrere Zahnräder mit Zähnezahlen zwischen 17 und 20 Zähnen. Diese Übersetzungen befinden sich mit dem bestehenden Zahnrad am Hinterrad in der Nähe der optimalen Übersetzung.

Buchsen Typ	Buchsen Bohrung	Anzug		Momente		Klemm- kraft			
				ohne Paßfeder	mit Paßfeder				
	mm	Nm		Nm	Nm	N			
1008	12	6 (5)	indestifte 2 socket set screws	22	136	3990			
	19			37		4940			
	24			58		5490			
1108	19	1/4" sw 3		40	147	4630			
	24			62		5220			
	28			71		5720			
1210 1215	16	20 (16)		82	407	8840			
	19			105		9800			
	24			140		10900			
	32			180		12300			
1310	14			210		59	435	7800	
	25					120		10900	
	35					210		12500	
1610 1615	19	3/8" sw 5		98	486	8500			
	24			135		9670			
	38			240		11900			
	42			265		12700			

Tabelle 7: Ausschnitt Tabelle "Übertragbare Momente mit Taper Spannbuchsen-Verbindungen"¹²⁹

¹²⁹ Vgl. <http://www.stennei.de/Technisches/Drehmomente-Buchsen.pdf>, (Stand: 19.01.2017)

5 Zusammen- und Einbau aller Komponenten

Dieses Kapitel behandelt die Funktionsprüfung aller Komponenten, den Zusammenbau der einzelnen Bestandteile und letztendlich den Einbau in den Motorradrahmen.

5.1 Überprüfung des Zusammenspiels der E-Komponenten

Bevor der Elektroantrieb endgültig im Rahmen verbaut werden konnte, musste überprüft werden, ob alle Einzelteile funktionieren und richtig miteinander arbeiten. Dazu wurde ein sogenannter „Werkbanktest“ durchgeführt. Hierfür wurden die einzelnen Teilsysteme wie die Antriebsbatterie, das Batteriemanagementsystem, der Controller, das Hauptrelais und der Motor provisorisch miteinander verbunden.

5.1.1 Vorbereitung der Zellen

Die Vorbereitung aller Zellen der Antriebsbatterie gestaltete sich zuerst in Form der Initialladung. Durch die Initialladung sollten alle Zellen das gleiche Spannungsniveau erreichen.

Um dies zu erreichen, mussten die Zellen parallel geschaltet und bis zum Erreichen der maximalen Ladespannung von 4 V^{130} geladen werden. Nach dem Abschluss der Ladung verblieben die Zellen noch zwei Tage in der Parallelschaltung. Durch diese Schaltung konnte sich das Ladungsniveau der einzelnen Zellen soweit ausgleichen, sodass alle Zellen die gleiche Kapazität und das gleiche Spannungsniveau besaßen.

Nach dem Beenden der IL wurde die Parallelschaltung entfernt und die Zellen in Serie geschaltet, sodass die in späterer Folge benötigte Betriebsspan-

¹³⁰ Vgl. https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/Stoltem/1578/GWL_LFP090Ah-Specifications.pdf, (Stand: 11.10.2016)

nung vorhanden war. Dabei wurden die Zellen auf einer Werkbank so platziert, dass für die anderen Komponenten noch genügend freier Platz übrig blieb.

5.1.2 Vorbereitung des Motors

Um unkontrollierte Bewegungen des Motors bei dessen Start zu verhindern wurde dieser auf die provisorische Motorhalterung montiert und in einem Schraubstock eingespannt. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Anschlusspunkte frei zugänglich waren.

5.1.3 Vorbereiten des Controllers und des BMS

Der Controller und das darauf geklebte Batteriemanagementsystem wurden mit-samt der Halterung auf zwei Holzstücken platziert, damit das auf der Platte befestigte Hauptrelais nicht zwischen Werkbank und Controller eingeklemmt wurde. Da der Controller und das BMS im Betrieb vom Bordnetz des Motorrades gespeist werden, wurde dieser Kabelstrang zuerst am Motorrad vorbereitet und konnte anschließend mit der Motorradbatterie benutzt werden.

Alle benötigten Verbindungen zu den bereits am Motorrad montierten Schaltern und dem Drehgasgriff wurden verlängert und an den Steuergeräten bzw. dem Hauptrelais angeschlossen. Dazu gehörten der „Not-Aus-Schalter“, der Seitenständerschalter, welche das Hauptrelais ansteuern und der Zündungsschalter, welcher den Controller, das BMS und ebenfalls das Hauptrelais mit dem Zündungsplus versorgen. Auch das Kabel des Drehpotentiometers musste verlängert werden. Außerdem wurden zur Signalisierung des Controllerbetriebs noch zwei LEDs angeschlossen und parallel zum Hauptrelais noch das Vorladerelais mit dazugehörigem Vorladewiderstand.

Da das Batteriemanagementsystem auch ohne Zündungsplus funktionieren soll, wurde extra eine Verbindung zwischen Motorradbatterie und BMS hergestellt. Dieser Stromkreis kann mit einem Kippschalter geschaltet werden. Zur Steuerung des Ladegeräts wurde zusätzlich ein Kippschalter benötigt, welcher dem BMS mitteilt, dass geladen werden soll. Wird dieser betätigt,

gibt es ein Steuersignal an ein Schaltrelais weiter, welches die Phase der Steckdose schaltet, in die das Ladegerät eingesteckt ist. Für dieses Signal musste eine steckbare Kabelverbindung hergestellt werden, welche das BMS mit dem Schaltrelais verbindet. Bei Erreichen der voreingestellten Zellen-
spannung schaltet das BMS das Relais und dem Ladegerät wird die Strom-
versorgung gekappt.

Jede Zelle wurde mit dem dazugehörigen Zellenmodul des BMS verbunden. Dazu wurde ein Schaltschema erstellt, welches auch in späterer Folge im Motorrad Gültigkeit besitzt. Auch das BMS-Display wurde an die BMS-
Steuereinheit angeschlossen.

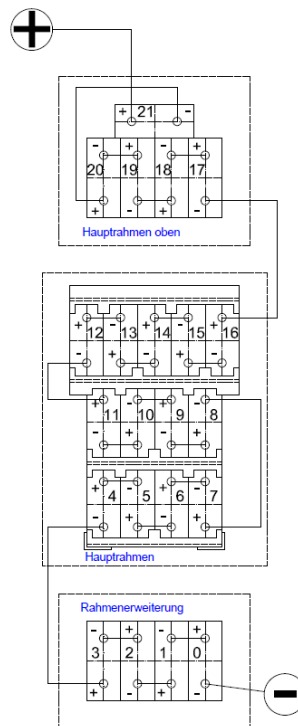


Abbildung 35: Zellenverschaltung

Die drei Phasen des Motors und die Hallgeber wurden mit dem Motorsteuer-
gerät verbunden.

Der Minuspol der Traktionsbatterie wurde am Controller und der Pluspol am
Hauptrelais angeschlossen. Anschließend wurde die Verbindung zwischen
Hauptrelais und Steuergerät hergestellt. Dabei wurde der Strommesssensor
des BMS über das Kabel gesteckt und mit dem Batteriemanagementsystem
verbunden. Parallel zum Hauptrelais wurde noch das oben erwähnte Vorla-
derelais, welches mit einem Vorladewiderstand in Serie geschaltet ist, mon-

tiert. Dieses Vorladerelais legt eine Teilspannung an den Motorcontroller. Somit wird verhindert, dass beim Schalten des Hauptrelais die Spannung der Traktionsbatterie schlagartig am Motorcontroller anliegt.

Der Controller wurde über eine RS232 Schnittstelle mit dem Computer verbunden. Mit einem, zum Controller passenden Programm von „Kelly Controls“ konnten die Grundparameter der Steuerung abgefragt und der Controller eingestellt werden.

5.1.4 Durchführen des Werkbanktests

Nachdem alle Komponenten soweit vorbereitet waren, wurden nochmals alle Klemmstellen und der feste Halt des Motors im Schraubstock kontrolliert. Nun wurde das BMS eingeschaltet und die Spannungen der einzelnen Zellen konnten kontrolliert werden. Hier musste leider festgestellt werden, dass nicht bei allen Zellen eine Spannung angezeigt wurde, obwohl an der Traktionsbatterie die gewünschte Spannung vorhanden war. Nach Betätigung der Zündung schaltete das Vorladerelais und der Motorcontroller wurde mit Betriebsspannung versorgt. Fünf Sekunden nach Einschalten der Zündung schaltete das BMS das Hauptrelais. Durch das Schalten des Hauptrelais wurde nun die Traktionsbatterie direkt mit dem Motorsteuergerät verbunden. Nun konnten auch der „Not-Aus“ Schalter und der Seitenständerschalter getestet werden. Durch Betätigen von nur einem der beiden Öffner-Kontakten wird die Spannungsversorgung der Hauptrelaisspule unterbrochen und der Relaiskontakt wird geöffnet, wodurch der Stromkreis zwischen Traktionsbatterie und Motorcontroller unterbrochen wird. Anschließend wurde die Stellung des Drehpotentiometers so lange langsam verändert, bis sich der Motor zu drehen begann. Diese Stellung wurde beibehalten, bis alle angezeigten Werte der Zellen kontrolliert waren. Diese Vorgehensweise wurde mehrmals mit verschiedenen Stellungen des Potentiometers durchgeführt. Da es bei den Zellen, welche am BMS angezeigt wurden, keine Spannungseinbrüche gab und der Motor auf die verschiedenen Stellungen des Gasdrehgriffes wie gewünscht reagierte, konnte der Werkbanktest soweit als bestanden angesehen werden.

Obwohl das BMS nicht ordnungsgemäß funktionierte, wurde beschlossen, den Antriebsstrang mit allen benötigten Komponenten im Rahmen zu verbauen und zu testen.

5.2 Einbau der neuen Komponenten in den Motorradrahmen

Soweit irgendwie möglich, wurden die benötigten Teile außerhalb des Rahmens vormontiert, sodass sie am Ende nur noch an den dafür vorgesehenen Halterungen oder Montagepunkten verschraubt werden mussten.

5.2.1 Einbau des Elektromotors

Der Motor wurde so mit der Motorplatte verschraubt, dass im eingebauten Zustand die Anschlüsse nach unten zeigen. Danach wurde die Platte mit dem angeschraubten Motor von einer Person in den Rahmen gehoben und von einer zweiten Person an den vorgegebenen Montagepunkten befestigt. Anschließend wurde die schon bei der Behelfsplatte verwendete Zusatzkonstruktion angeschraubt.

5.2.2 Bestückung und Einbau des Batterieracks

Bevor das Batterierack ins Chassis eingebaut werden konnte, mussten die Zellen nach dem vorgegebenen Schaltschema im Batterierahmen platziert werden. Wie schon erwähnt, wurden bei der Montage des Racks M5-Senkkopfschrauben mit Beilagscheiben und selbstsichernden Muttern verwendet. An einigen Stellen wurden die selbstsichernden Muttern gegen normale Sechskantmutter ausgetauscht, welche mit Schraubensicherungskleber gesichert wurden. Konstruktionsbedingt ist es nur möglich, den Hauptrahmen in einer vorgegebenen Reihenfolge zusammen zu schrauben.

5.2.2.1 Schritt 1: Einbau der unteren vier Zellen in den Hauptrahmen

Zuerst mussten der Boden und der mittlere Rahmen zusammengeschraubt werden. Anschließend wurden die vier Streben, welche zur Verbindung mit dem Oberteil des Rahmens Verwendung finden, montiert. Danach wurden die vier Streben für den Boden so befestigt, dass die Streben zwar durch die

Schrauben gehalten wurden, die Muttern aber nur so weit auf die Schrauben aufgedreht wurden, dass sich die Streben noch so weit wie möglich zur Seite bewegen lassen konnten. Nun musste man das Mittelteil auf den Kopf stellen und nach Vorgabe des Schaltschemas mit Zellen bestücken. War dies erledigt, wurden im Bodenrahmen die benötigten Schrauben platziert und auf die bereits platzierten Zellen gesetzt. Anschließend konnten die Streben zwischen Mittel- und Bodenrahmen verschraubt werden.

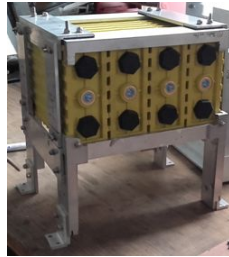


Abbildung 36: Die ersten vier Zellen im verbauten Zustand

5.2.2.2 Schritt 2: Einbau der vier mittleren Zellen des Hauptrahmens

Hierzu musste das Konstrukt wieder gedreht werden. Vor dem Einsetzen der Zellen mussten die beiden M8-Schrauben, welche zur Befestigung des Batterieracks am Hilfsrahmen des Motorrades dienen, durch die dafür vorgesehenen Schraubenlöcher gesteckt werden. Nun konnten die nächsten vier Zellen platziert werden.



Abbildung 37: Mit Zellen befüllter Boden und Mittelteil (ohne M8 Schrauben)

5.2.2.3 Schritt 3: Einbau der fünf Zellen des Oberteils

Für diesen Schritt musste der untere Rahmen des Oberteils mit dessen Streben verschraubt werden. Anschließend wurde dieser halbe Rahmen mit den Winkeln des Mittelteils verbunden. Danach wurde der Winkel zur Befestigung der Rahmenerweiterung an den Streben montiert.



Abbildung 38: Halbfertiger Batterierahmen

Nun konnte dieser Teilrahmen wieder mit den Zellen befüllt werden. Anschließend wurden die einzelnen Rahmenteile, an denen die Winkel für die obersten fünf Zellen bereits vormontiert wurden, mit den Streben des Oberteils verschraubt werden. Somit war der Hauptrahmen bereit zum Einbau ins Motorrad.



Abbildung 39: Mit Zellen befüllter Hauptrahmen

5.2.2.4 Schritt 4: Einbau des Batterierack-Hauptrahmens in das Motorrad

Für den Einbau mussten zuerst die beiden Streben des Motorrad-Hilfsrahmens entfernt werden. Anschließend wurde der mit den Zellen befüllte Hauptrahmen der Traktionsbatterie mit Hilfe eines Wagenhebers so positioniert, dass die beiden oberen M8-Schraubverbindungen mit dem Motorradrahmen hergestellt werden konnten. Danach wurden die beiden Streben des Hilfsrahmens wieder montiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die bereits vorbereiteten M8-Schrauben am Batterierack in Position waren und durch die bestehenden Löcher in den Bügeln des Hilfsrahmens gesteckt werden konnten. Dadurch wurde die Schraubenverbindung mit dem Hilfsrahmen herge-

stellt. Somit war der Hauptrahmen der Batterie fertig montiert. Danach konnte der Wagenheber entfernt werden.

5.2.2.5 Schritt 5: Montage der Rahmenerweiterung und Platzieren der restlichen Zellen

Letztendlich wurde der Batterierahmen mit der Montage der Rahmenerweiterung komplettiert. Hierfür wurde der letzte vormontierte Rahmen mit dem am Hauptrahmen bereits angeschraubten Winkel und der Motorplatte verbunden. Nun konnten die letzten neun Zellen in Position gebracht werden. Vier in der Rahmenerweiterung und fünf nochmals auf dem Hauptrahmen.



Abbildung 40: Montierte Traktionsbatterie

Befestigt wurden diese neun Zellen mittels Polyester-Spanngurten mit einer Reißfestigkeit von 300 *kg*, welche am Hauptrahmen der Traktionsbatterie bzw. an der Rahmenerweiterung angeschlagen wurden.

5.2.3 Einbau des Motorcontrollers und des BMS

Zuerst wurden die vier Winkel der Controllerhalterung, welche für den Motorradrahmen konstruiert wurden, an den am Rahmen vorhandenen Befestigungspunkten befestigt. Hierfür mussten M8 Schraubenverbindungen verwendet werden. Danach wurden die vier Winkel und das Hauptrelais mit M5-Senkkopfschrauben mit Beilagscheiben und selbstsichernden Muttern an der Platte für den Motorcontroller befestigt. Anschließend konnte der Motorcontroller mit der aufgeklebten BMS-Platte wiederum mit M5-Schraubenverbindungen an die Platte geschraubt werden. Nach der Vormon-

tage aller benötigten Winkel wurde eine M10-Gewindestange mit mehreren Muttern durch die Winkel an der Platte gesteckt, wobei die Muttern so positioniert werden mussten, dass sich jeweils vor und nach den Winkeln Muttern befanden. Danach konnte die Controllerplatte mit der Gewindestange zwischen den beiden am Motorradrahmen befestigten Winkeln eingefädelt werden. Mit Hilfe der Muttern wurde die Platte anschließend im Motorradrahmen zentriert und geklemmt. Danach wurden die unteren Winkel, welche am Motorradrahmen und der Controllerplatte befestigt waren, miteinander verschraubt. Somit war der Motorcontroller und das BMS, bis auf das Display des Batteriemanagementsystems, montiert.

Das BMS-Display fand seinen Platz anstelle des nicht mehr benötigten Drehzahlmessers. Hierzu wurden der Drehzahlmesser und die Anzeige der Kühlmitteltemperatur entfernt und das Gehäuse aufgeschnitten, bis nur noch die Außenkontur der Bordarmatur bestehen blieb. Danach wurde eine Acrylglasplatte mit der bestehenden Kontur des Armaturengehäuses erstellt und so bearbeitet, dass die Taster des BMS-Displays bedient werden können. Nun konnte das Display mit der Acrylglasplatte verschraubt und diese anschließend mit dem Gehäuse verschraubt werden. Da im Gehäuse zu wenig Platz vorhanden war, wurde eine zusätzliche Temperatur- und Spannungsanzeige auf die Platte geklebt. Diese zusätzliche Anzeige wird verwendet, um die Temperatur zwischen den Batteriezellen wiederzugeben und um die Spannung der Motorradbatterie, welche das BMS und den Controller versorgt, ablesen zu können. Sämtliche Anschlussleitungen wurden durch ein Loch an der Rückseite des Armaturenrägers geführt und mit dem bestehenden Kabelsträngen durch eine Durchführung im Rahmen auf dessen Innenseite geführt, wo sie mit dem BMS und der benötigten Stromversorgung verbunden wurden.

5.3 Konfektionierung der benötigten Kabelbäume

Die passenden Kabellängen und die Führung der einzelnen Kabelbäume konnten nur mit den eingebauten Komponenten bestimmt werden.

5.3.1 Anschluss des Motorcontrollers am Bord Netz

Damit die Antriebsbatterie ihre volle Kapazität für die Reichweite nutzen kann, wurde beschlossen, den Motorcontroller und das Batteriemanagementsystem mit dem bestehenden Bord Netz zu speisen. Das BMS wurde direkt, aber schaltbar an die Motorradbatterie angeschlossen. Die Spannungsversorgung des Controllers erfolgt über das Zündungsplus. Außerdem wurden eine grüne und eine rote LED zur Funktionskontrolle des Controllers an das Controller – Anschlusskabel angeschlossen. Die beiden Leuchtdioden fanden ihren Platz in der bestehenden Instrumententafel des Motorrades.

5.3.2 Anschluss des Elektromotors am Motorcontroller

Zur Verbindung von Controller und Elektromotor dienen drei Aderleitungen für die Fasen und fünf Aderleitungen für die Hallgeber. Für die Verbindung der Fasen wurde eine geschirmte 70 mm^2 „Ölflex FD 90 CY2“ Lapp Aderleitung¹³¹ verwendet. Der große Querschnitt wurde gewählt, damit bei einem hohen Stromdurchfluss so wenige Verluste wie möglich, generiert werden. Ein großer Nachteil dieser Aderleitung ist der hohe Platzbedarf, da die Biegeradien groß sind. Für die restlichen fünf Adern fanden FLRY $0,5 \text{ mm}^2$ Fahrzeugleitungen Verwendung. Diese wurden controllerseitig mit dem Anschlusskabel des Controllers verlötet und motorseitig mit einem Stecker versehen.

5.3.3 Verbindung zwischen Motorcontroller und Traktionsbatterie

Für diese Verbindungen wurden ebenfalls die Lapp Aderleitungen verwendet. Die Leitung zum Minuspol der Batterie wurde am Controller angeschlossen und für die Anbindung an die Batterie vorbereitet. Die Verbindung der Plusleitung gestaltete sich etwas aufwändiger. An der Controllerseite wurde ein Aluminiumstück zurecht gefeilt, über welches der induktive Stromwandler für

¹³¹ Vgl. <http://www.lappkabel.de/produkte/online-kataloge-shop/anschluss-und-steuerleitungen/anwendung-in-energiefuehrungsketten/vielseitige-anwendungen-zertifiziert/oelflex-fd-90-cy.html>, (Stand: 28.01.2017)

die Stromzählung des BMS, geschoben wurde. An diesem Adapter wurde wiederum eine Aderleitung angeschlossen, welche am anderen Ende mit dem Hauptrelais verbunden wurde. Danach wurde eine weitere Leitung vorbereitet zur Verbindung zwischen Hauptrelais und Pluspol der Batterie. Diese Leitung wurde vorerst nur am Hauptrelais montiert. Das Hauptrelais wurde mit FLRY 1 mm² Fahrzeugleitungen mit den bestehenden Leitungen des Not-Aus-Schalters und des Seitenständerschalters verlötet. Durch diese Schaltung ist es unmöglich, das Motorrad in Betrieb zu nehmen, wenn der Seitenständer nicht angeklappt ist und das Hauptrelais kann in Notsituationen jederzeit mit dem „Not-Aus“ abgeschaltet werden, wodurch der Stromkreis zwischen Antriebsbatterie und Controller unterbrochen wird.

5.3.4 Anschluss des BMS am Bord Netz und Verkabelung aller zum System gehörigen Bauteile

Für die Verdrahtung der einzelnen Komponenten des BMS fanden FLRY Fahrzeug Aderleitungen mit einem Querschnitt von 0,5 mm² Verwendung. Zur Spannungsversorgung wurden Aderleitungen mit einem Querschnitt von 0,75 mm² verwendet. Das Display wurde mit dem mitgelieferten Flachbandkabel mit der Steuereinheit des BMS verbunden, genauso wie die einzelnen Zellenmodule. Aufwändiger gestaltete sich die Verkabelung der einzelnen Zellenmodule mit den jeweiligen Zellen. Hierfür wurden fünf einzelne Kabelbäume angefertigt. Diese Kabelbäume verbinden, je nach Ebene, die jeweiligen vier bis fünf Zellen des Batterieracks mit den dazugehörigen Zellenmodulen.



Abbildung 41: Konfektionierter Kabelstrang für vier Zellen

Auf der Seite der Zellenmodule wurden die einzelnen Leitungen mit Aderendhülsen versehen und auf der Zellen­seite mit Ringkabelschuhen. Nachdem die Kabelbäume fertiggestellt waren, wurde die Seite der Zellenmodule an

diese angeschlossen. Der Anschluss zellenseitig wurde erst später bei der Serienschaltung der Zellen vollzogen. Zusätzlich wurde noch der Sensor für die Stromzählung mit drei Aderleitungen mit der BMS-Steuereinheit verbunden.

5.3.5 Serienschaltung der Zellen

Die Serienschaltung der Zellen war aufgrund der engen Platzverhältnisse eines der heikelsten Unterfangen dieses Projekts. Um Kurzschlüsse beim Einbau in den Motorradrahmen weitestgehend zu vermeiden, wurde beschlossen, dass die Serienschaltung der Zellen erst nach dem Einbau erfolgte. Die Sicherungskappen an den Polen der betroffenen Zellen wurden erst vor dem Anklemmen der Zellenverbinder bzw. den Leitungen abgenommen. Zuerst wurden die Zellen in den einzelnen Ebenen, genau nach dem Schalt-schema, mit Hilfe von Zellenverbindern miteinander verbunden. Gleichzeitig konnten die Leitungen zu den Zellenmodulen des BMS mitgeklemmt werden. Danach wurden die Verbindungen zwischen den Ebenen des Batterieracks hergestellt und geklemmt. Dies wurde mit einer Lapp Aderleitungen bewerkstelligt. Beim Anschrauben dieser Verbindungen wurden auch wieder die Leitungen zu den Zellenmodulen mitgeschraubt. Nach Beendigung dieser Arbeiten war die Antriebsbatterie fertiggestellt und die letzten beiden Anschlüsse, zur Verbindung mit dem Motorcontroller, an den Polen konnten belegt werden.

5.3.6 Anschluss des Ladegerätes

Das Ladegerät wird mittels Steckverbindung mit den beiden Polen der Traktionsbatterie verbunden. Der Stecker befindet sich im Ablagefach des Motorrades. Für diese Verbindung werden FLRY Fahrzeug Aderleitungen mit einem Querschnitt von $2,5 \text{ mm}^2$ verwendet. Mit Hilfe des Batteriemanagementsystems kann ein Schütz angesteuert werden, welcher das Ladegerät ans bzw. vom Netz nimmt. Dazu wird mittels eines Schalters, welcher mit dem BMS verbunden ist, dem Batteriemanagement mitgeteilt, dass die Traktionsbatterie geladen werden soll. Falls das Fahrzeug noch im Betriebsmodus ist (Hauptrelais und Vorladerelais haben geschaltet), werden diese vom BMS

abgeschaltet und somit das Motorsteuergerät von der Antriebsbatterie getrennt. Gleichzeitig wird vom BMS eine 12 V Spannung erzeugt, welche den Schütz steuert. Um diese Steuerspannung übertragen zu können, wird eine weitere Steckverbindung benötigt. Hierzu werden FLRY Fahrzeug Aderleitungen mit einem Querschnitt von 1 mm² verwendet. Dieser Stecker befindet sich ebenfalls im Ablagefach.

6 Erstellen eines Testkonzepts und Fahrtests

Um herauszufinden wie sich die Systeme im Betrieb verhalten, inwieweit die Energierückgewinnung das Handling beeinflusst und wie die Performance des gesamten Motorrades mit und ohne Rekuperation ist, wurde ein aufbauendes Testkonzept erstellt und in Fahrtests umgesetzt.

6.1 Aufbau des Testkonzepts

Geplant war, dass das Motorrad in mehreren Schritten getestet werden sollte. Angefangen von kurzen Fahrversuchen, bei denen die grundsätzlichen Funktionen der verbauten Systeme beobachtet wurden, aber auch die Wirkungsweise der Bremsen und der Dämpfung. Bis hin zu Langstreckentests mit und ohne Energierückgewinnung, womit der Wirkungsgrad der elektromechanischen Bremse festgestellt und die tatsächliche Reichweite bestimmt werden können.

Aufgrund des fehlerhaft arbeitenden BMS und um die Zellen nicht unnötig zu belasten, wurde beschlossen, auf Tests mit Energierückgewinnung zu verzichten und nur einen Langstreckentest zu vollziehen.



Abbildung 42: Motorrad vor der ersten Testfahrt

6.2 Festlegen des Umfangs der einzelnen Tests

Der Umfang der einzelnen Tests richtete sich immer auf wenige Punkte, damit der Tester seine Aufmerksamkeit genau auf diese fokussieren konnte. Die Anzahl der an einem Tag durchgeführten Tests war abhängig von der Restkapazität der Traktionsbatterie, der benötigten Zeit für die erforderlichen Umbauten und dem Wetter.

6.2.1 Test 1: Funktionsprüfung aller benötigten Systeme und Handlingverhalten im Stand und bei langsamer Fahrt

Bei diesem Test richtete sich das Augenmerk des Testers grundsätzlich auf die Funktion des Antriebsstranges, des Batteriemanagementsystems, der Lenkung, den Bremsen und der Dämpfung. Zusätzlich konnte das Ansprechverhalten des Motors auf das Öffnen des Drehpotentiometers eingestellt werden.

Testort war ein großer Parkplatz in Schwanenstadt.

Testablauf:

- Sichtkontrolle des Motorrades

- Kontrolle der Lenkung, der Dämpfung und der Bremsen im Stand und durch manuelles Anschieben
- Systemcheck nach dem Einschalten
- Erste Anfahr- und Abbremsmanöver
- Einstellen des Ansprechverhaltens des Motors
- Fahren in Schrittgeschwindigkeit
- Fahren mit Geschwindigkeiten bis $20 \frac{km}{h}$
- Kontrolle der Zellenspannungen
- Nachkontrolle des Antriebsstrangs

6.2.2 Test 2: Fahrverhalten des Fahrzeugs bei größerer Beschleunigung und gewöhnen an das Handling

Bei diesem Test wurde das Motorrad mehrmals mit höheren Werten beschleunigt und wieder abgebremst. Außerdem wurde darauf geachtet, wie sich das Fahrzeug beim Kurvenfahren verhält. Zusätzlich wurden dem Ansprechverhalten des Motors und der Übersetzung nochmals Aufmerksamkeit geschenkt.

Testort war ein großer Parkplatz in Schwanenstadt.

Testablauf:

- Sichtkontrolle des Motorrades
- Kontrolle der Lenkung, der Dämpfung und der Bremsen im Stand und durch manuelles Anschieben
- Systemcheck nach dem Einschalten
- Beschleunigungs- und Bremsversuche, dem zur Verfügung stehenden Platz angemessen
- Kontrolle des Ansprechverhaltens des Motors
- Kontrolle der Zellenspannungen
- Nachkontrolle des Antriebsstrangs

6.2.3 Test 3: Fahrt im Stadtgebiet und auf der Landstraße, Einstellen der Übersetzung

Mit Hilfe eines Begleitfahrzeuges, welches hinter dem Motorrad nachfuhr, um bei einem Defekt einen gewissen Schutz bieten zu können. Wurde bei diesem Test das Fahrverhalten im Stadtgebiet und auf der Landstraße getestet. Nun sollte nochmals die Übersetzung kontrolliert und anschließend, wenn notwendig, geändert werden.

Testort: Schwanenstadt und Umgebung

Testablauf:

- Sichtkontrolle des Motorrades
- Kontrolle der Lenkung, der Dämpfung und der Bremsen im Stand und durch manuelles Anschieben
- Systemcheck nach dem Einschalten
- Beobachten des Fahrverhaltens im Stadtgebiet
- Kontrolle des Ansprechverhaltens des Motors
- Beobachten des Fahrverhaltens auf der Landstraße, insbesondere das Handling bei schnellerer Kurvenfahrt
- Einstellen der Übersetzung
- Kontrolle der Zellenspannungen
- Nachkontrolle des Antriebsstrangs

6.2.4 Test 4: Überprüfung der Reichweite

Bei den vorhergehenden Tests, welche mit einer Batterieladung durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass sich die einzelnen Zellenspannungen nicht großartig geändert hatten. Nur bei der Überprüfung der Übersetzung, wobei mehrmals versucht wurde die Höchstgeschwindigkeit zu erreichen und das Motorrad voll beschleunigt wurde, fielen die Spannungen der einzelnen Zellen etwas ab. Durch diese Beobachtung wurde beschlossen, einfach los zu fahren und so lange zu fahren, bis der Controller das unterste Spannungsniveau der Batterie von 62,7 V misst und abschaltet. Bei dieser Ausfahrt sollte das Motorrad von einem Begleitfahrzeug mit Anhänger begleitet werden.

Zusätzlich sollte die Fahrt mit einem „Garmin GPSmap 60CSx“ GPS-Tracker aufgezeichnet werden.

Testort: Bezirk Vöcklabruck, Schwanenstadt Umgebung

Testablauf:

- Sichtkontrolle des Motorrades
- Kontrolle der Lenkung, der Dämpfung und der Bremsen im Stand und durch manuelles Anschieben
- Systemcheck nach dem Einschalten
- Kontrolle der Zellenspannungen bis zum Erreichen der Entladespannung
- Nachkontrolle des Antriebsstrangs

6.3 Auswertung der Testergebnisse

Trotz der Unannehmlichkeiten mit dem Batteriemanagementsystem wurde beschlossen, einige Tests durchzuführen.

6.3.1 Zusammenfassung des 1. Tests

Beim ersten Test konnte festgestellt werden, dass beim Zusammenbau des Chassis und beim Einstellen der Dämpfungselemente keine Fehler passiert sind. Auch das Bremssystem funktioniert einwandfrei.

Das Ansprechverhalten des Motors auf die Impulse vom Gasdrehgriff musste korrigiert werden, weil die Einstellung im Controller eine Verzögerung verursacht hatte. Beim Gasgeben sprach der Motor später an und bei der Gaswegnahme lief der Motor noch etwas nach.

6.3.2 Zusammenfassung des 2. Tests

Das Handling des Motorrades ist akzeptabel. Trotz des hohen Schwerpunktes, hervorgerufen durch die Positionierung der Zellen und des Controllers, ist kein unangenehmes Einknicken beim Kurvenfahren zu spüren und auch

sonst bringen die geänderten Gewichtsverhältnisse keine Unruhe ins Fahrwerk.

Das Ansprechverhalten des Motors, welches nach dem ersten Test geändert worden ist, ist nun angenehm und in etwa mit einem Vergasermotor zu vergleichen.

Beim Beschleunigen fiel auf, dass die Übersetzung etwas zu hoch gewählt worden ist.

6.3.3 Zusammenfassung des 3. Tests

Dieser Test wurde mit einem Begleitfahrzeug durchgeführt, welches dem Motorrad mit genügend Abstand folgte, um bei einem Defekt sofort die Warnblinkanlage aktivieren zu können und somit die Gefahr eines Auffahrunfalles zu minimieren.

Vor dem Test wurde die Übersetzung geändert. Hierfür wurde ein Ritzel mit 17 Zähnen verbaut, wodurch sich die Übersetzung von 2,579 auf 2,882 änderte. Die Beschleunigung wurde dadurch zwar verbessert, aber bei der Endgeschwindigkeit mussten dafür Einbußen in Kauf genommen werden.

Im Stadtgebiet ist das Zusammenspiel von Motor und Getriebe angenehm zu fahren, vor allem weil man beim Anfahren und Stehenbleiben keine Kupplung betätigen muss, sondern wie bei einem Automatikgetriebe einfach gasgeben bzw. bremsen muss.

Das Fahrverhalten auf der Landstraße ist ebenfalls sehr angenehm. Im Vergleich mit einem Motorrad mit Schaltgetriebe ist das Abbremsen vor Kreuzungen etwas komisch, weil das Runterschalten gänzlich weg fällt und dies doch bei einem Verbrennermotorrad mit Schaltung eine der Haupttätigkeiten beim Abbremsen ist.

6.3.4 Zusammenfassung des 4. Tests

Für den vierten Test wurde wiederum ein Begleitfahrzeug eingesetzt. Dieses Mal mit Anhänger, um das Motorrad nach dem Abschalten des Controllers

und dem damit verbundenen Stillstand sofort verladen zu können. Die Testfahrt wurde mit einem Garmin GPSmap 60CSx aufgezeichnet und mit der Software Garmin Basecamp¹³² ausgewertet.

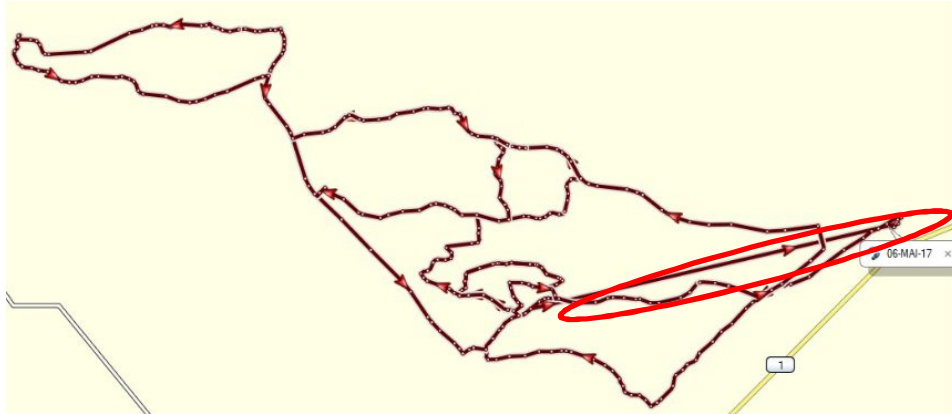


Abbildung 43: aufgezeichnete Strecke Langstreckentest

Die zurückgelegte Strecke wurde bei der Aufzeichnung vom Gerät ohne Zutun in vier Teilabschnitte unterteilt. Bei einem dieser Abschnitte (rot markiert) wurde nicht aufgezeichnet. Somit waren die GPS-Daten auch nicht vollständig. Der Tageskilometerzähler zeigte einen Kilometerstand von 60,2 km. Die restlichen drei aufgezeichneten Teilabschnitte wurden mit Längen von 4,7 km, 49,6 km und 1,2 km angegeben.

Zur Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeit wurde die Auswertung des zweiten Teilabschnittes verwendet. Bei einer Strecke von 49,6 km betrug die Durchschnittsgeschwindigkeit $59 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Übersicht	Zeit	Geschwindigkeit	Höhe
Punkte: 3177	Verstrichene Zeit: 1:10:05	Durchschnitt: 42 km/h	Min.: 385 m Anstieg: 743 m
Länge: 49,6 km	Zeit in Fahrt: 0:50:25	Durchschnitt in Fahrt: 59 km/h	Max.: 590 m Abstieg: 701 m
Fläche: 9,2 qkm	Pausenzeit: 0:19:40	Min.: 0 km/h	Neigung: 0,1 %
		Max.: 286 km/h	

Abbildung 44: Ausschnitt der Aufgezeichneten Daten des 2. Teilabschnittes

Das Motorrad musste 743 Höhenmeter überwinden, wobei die größte Steigung 14,6 % betrug.

¹³² Vgl. <http://www.garmin.com/de-AT/shop/downloads/basecamp>, (Stand: 05.05.2017)

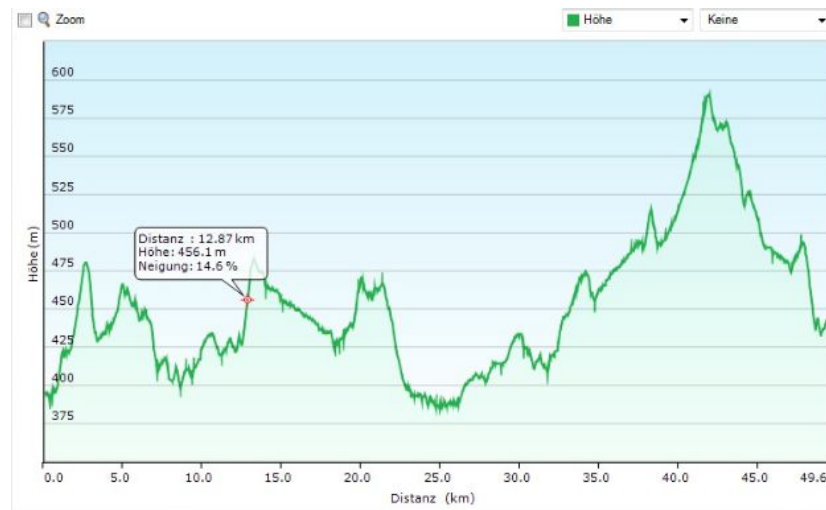


Abbildung 45: Höhenprofil 2. Teilabschnitt

Mit den Ergebnissen des zweiten Teilabschnittes alleine konnten die Vorgaben bereits erreicht und überboten werden. Somit konnte dieser Test erfolgreich abgeschlossen werden.



Abbildung 46: Motorrad auf Anhänger nach dem Langstreckentest

7 Fazit

Vernachlässigt man bei der Betrachtung eines elektrisch betriebenen Fahrzeuges die Schadstoffbelastung durch das Erzeugen und Entsorgen der Akkumulator Zellen und die Schadstoffbelastung durch die Stromerzeugung und setzt den Fokus nur auf die Leistungsfähigkeit eines Elektrofahrzeuges. Kann man sagen, dass der Elektroantrieb im urbanen Bereich zum Pendeln zur und von der Arbeit oder für kurze Strecken, sehr wohl eine Alternative zum Verbrennungsmotor darstellt. Die größten Vorteile eines Elektroantriebes sind immer noch, dass während des Betriebs weder Lärm noch Schadstoffe produziert werden. Ein weiterer Vorteil ist das hohe Drehmoment, welches vom Stand weg zur Verfügung steht. Dies ermöglicht eine sehr komfortable Fahrweise, vor allem im Stadtgebiet.

Natürlich ist es auch mit intelligenter Planung der Ladestops möglich, größere Strecken zurückzulegen, in diesem Punkt sind aber verbrennungsmotorbetriebene Fahrzeuge aufgrund der besser ausgebauten Infrastruktur noch im Vorteil.

7.1 Zusammenfassende Darstellung des Projekts

Die Durchführung dieses Projekts beinhaltete mehrere spannende und interessante Themen, die es zu meistern gab. Mit eines der lehrreichsten und herausforderndsten Kapitel war die Antriebsauslegung und Auswahl der dazugehörigen Komponenten. Des Weiteren waren die Konstruktion der Halterungen und die Unterbringung dieser im Chassis sehr interessant.

Am aufschlussreichsten waren aber die Testfahrten. Die Tests bewiesen, wie komfortabel sich der Elektroantrieb im Betrieb verhält, sei es im Stadtgebiet oder auf der Landstraße und wie leistungsfähig ein Elektroantrieb, gegenüber einem gleichstarken Viertaktmotor ist. Das einzige aber große Manko ist die Reichweite.

Diese wäre bei diesem Projekt nur mit erhöhtem finanziellem Aufwand zu ändern gewesen, indem leistungsstärkere Zellen verbaut worden wären.

Kann man aber die Prioritäten an das Fahrzeug, wie in diesem Fall, genau abstecken, vor allem bei der Reichweite ist ein elektrisch betriebenes Fahrzeug allemal eine Überlegung wert.

7.2 Ausblick

Wenn künftige Akkumulatortypen höhere Leistungsdichten aufweisen und kostengünstiger werden, könnten Elektrofahrzeuge allgemein günstiger werden und mit größeren Reichweiten aufwarten. Wenn dann auch noch die Infrastruktur der Ladestellen ausgebaut wird und sich die Ladezeiten verkürzen, kann es vielleicht sein, dass der Elektroantrieb die herkömmlichen Verbrennungsmaschinen ersetzt.

In diesem Fall stellt sich aber die Frage, wie die Energieerzeuger dann diese gigantischen Mengen an Energie bereitstellen können?

Bis zur Straßenzulassung gibt es noch einige Hürden zu bewältigen. Zuerst muss das Batteriemanagementsystem repariert bzw. ersetzt werden, dann müssen noch die Traktionsbatterie, die Anschlüsse des Controllers und des Motors verblendet werden und somit unzugänglich für Dritte gemacht werden. Auch die Verkleidung muss noch etwas angepasst und in der gewünschten Farbe lackiert werden.

Für dieses Elektromotorrad wird gehofft, dass der zweite Akku-Satz, zum gleichen Preis, eine höhere Reichweite erzielt. Des Weiteren wird noch an eine Möglichkeit gedacht, mit Hilfe eines Mini-Computers, wie den „Raspberry Pi“, die Eingriffe in die Motorsteuerung auch am Fahrzeug, ohne dass ein Laptop benötigt wird, durchführen zu können.

Literatur

- Herry, 2011 Herry, Max; Österreich Verkehr in Zahlen 2011. Ausgabe 2011. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, (Stand:23.03.2013)
- Google maps, 2016 <https://www.google.at/maps>, (Stand: 15.09.2016)
- Stromkennzeichnungsblatt, 2015 Kraftwerk Glatzing-Rüstorf; Stromkennzeichnungsblatt-2015; Schwanenstadt, (Stand: 12.09.2016)
- Gratis Motorradtesttage, 2016 http://www.arge2rad.at/index.php?aufruf_presse=gratis_motorrad_testtage_3x_oestterreich_2016.html&id=128, (Stand: 12.11.2016)
- BMW C Evolution, 2016 http://www.bmw-motorrad.at/at/de/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.at/at/de/fascination/modern_mobility/overview_mobility.html, (Stand: 12.11.2016)
- KTM Super Adventure, 2016 <http://www.ktm.com/at/travel/1290-super-adventure-r/>, (Stand: 12.11.2016)
- TT Fact Zone, 2016 <http://www.iomtt.com/TT-Database.aspx>, (Stand: 09.11.2016)

Chip Yates: <http://www.rockstarofscience.com/index.html>, (Stand: 11.11.2016)
The Rockstar
of Science,
2016

Front wheel
energy recov-
ery system,
2016

Yates, III William M.;Ingram, Benjamin T., 2012, USA, United
StatesPatent Application Publication

Lightning
beats the
world best gas
motorcycles at
PPIHC, 2016

<http://lightningmotorcycle.com/lightning-beats-the-world-best-gas-motorcycles-at-ppihc/>, (Stand:14.11.2016)

Rückblick auf
das Münch-
Racing Team,
2016

<http://www.kradblatt.de/2013-11-02-09-27-53/sonstiges/101-sport/1789-rueckblick-auf-das-muench-elektro-racing-team>,
(Stand:14.11.2016)

Zero Mtorcyc-
les, 2016

http://www.zeromotorcycles.at/index_at.html, (Stand: 04.11.2016)

Brammo,
2016

<https://www.brammo.com/>, (Stand: 04.11.2016)

Lightning
electric mo-
torcycles,
2016

lightningmotorcycle.com, (Stand: 15.11.2016)

Polaris, 2016

<http://www.polaris.com/en-us>, (Stand: 04.11.2016)

- KTM e-ride, 2016 <http://www.ktm.com/at/e-ride/>, (Stand: 15.11.2016)
- Johammer J1, 2016 <http://www.johammer.com/elektromotorrad/>, (Stand: 15.11.2016)
- energica ego, 2016 <http://www.energicamotor.com/energica-ego-electric-superbike/>, (Stand: 15.11.2016)
- energica eva, 2016 <http://www.energicamotor.com/energica-eva-electric-streetfighter/>, (Stand: 19.11.2016)
- Fachwissen E-Bike, 2013 Dipl. Ing. Gressmann, Michael; Müller, Eberhard: Fachwissen E-Bike Technik der Leicht-Elektrofahrzeuge. 1., Auflage. Haan-Gruiten, Europa Lehrmittel, 2013
- Reifenberechnung, 2014 <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Reifenberechnung.htm>, (Stand: 27.03.2014)
- Motorradtechnik, 2010 Stoffregen, Jürgen: Motorradtechnik Grundlagen und Konzepte von Motor, Antrieb und Fahrwerk. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik, 2000 Bohner, Max; Keil, Wolfgang; Leyer, Siegfried; Pichler Wolfram; Saier, Wolfgang; Schmidt, Harro; Siegmayer, Paul; Zwickel, Heinz: Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik. 13. Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2000
- Manufacturer Specs Mars ME0913, 2016 http://www.quadmotion.se/shop/files/ME0913_Mars180A/Manufacturer_Specs.en.pdf, (Stand: 30.09.2016)

- Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik, 2009 Babel, Gerhard: Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik Lehr- und Arbeitsbuch. 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009
- LFP090AHA cell specification, 2016 https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/Stoltem/1578/GWL_LFP090Ah-Specifications.pdf, (Stand: 11.10.2016)
- Elektrotechnik für Ingenieure 1, 2007 Weißgerber, Wilfried; Elektrotechnik für Ingenieure 1 Gleichstromtechnik und Elektromagnetisches Feld. 7., überarbeitete Auflage. Wiesbaden, Vieweg, 2007
- Kelly KHB/HP High Power Brushless Motor Controller User`s Manual, 2016 http://kellycontroller.com/mot/downloads/KellyKHB_HPUserManual.pdf, (Stand: 27.10.2016)
- Gasgriff komplett Modell 317 Magura, 2016 <http://www.motorradparts24.de/fahrgestell2/lenkung/lenkerarmaturen/gasgriff-komplett-modell-317-magura/a-5137571/>, (Stand 27.10.2016)
- Battery Management Systems, 2002 Bergveld, Henk Jan; Kruijff, Wanda S.; Notten Peter H.L.; Battery Management Systems. 1. Auflage, Philips Research Laboratories, Eindhoven, Kluwer Academic Publishers, 2002
- Rosenbauer Panther, 2016 <http://www.rosenbauer.com/de/at/world/fahrzeuge/flughafenloesch/fahrzeuge/panther.html>, (Stand: 10.12.2016)

Rolloff/Matek Maschinenelemente, Tabellen, 2001	Matek, Wilhelm; Muhs, Dieter; Wittel, Herbert: Rolloff / Matek Maschinenelemente Tabellen. 15., durchgesehene Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2001
K05 Einfache Spannungsnachweise	http://www.aluinfo.de/download.html?id=16 (Stand: 30.12.2016)
Gebraucht Markt: Aprilia SL 1000 Falco, 2010	http://www.motorradonline.de/gebrauchte-motorraeder/gebrauchtmarkt-aprilia-sl-1000-falco.341170.html , (Stand: 07.01.2017)
Kettenteilungen, 2009	http://www.gs-classic.de/technik/tech_kette01.htm , (Stand: 07.01.2017)
Datenblatt Lapp-Aderleitung, 2013	Vgl. http://www.lappkabel.de/produkte/online-kataloge-shop/anschluss-und-steuerleitungen/anwendung-in-energiefuehrungsketten/vielseitige-anwendungen-zertifiziert/oelflex-fd-90-cy.html , (Stand: 28.01.2017)
Garmin basecamp, 2017	http://www.garmin.com/de-AT/shop/downloads/basecamp , (Stand: 05.05.2017)

Anlagen

Teil 1	A-1 – A-6
Teil 2	A-7 – A-13

Anlagen, Teil 1: „Antriebsauslegung mit Annahmen“

Antriebsauslegung mit Annahmen e-Motorrad:

Berechnung der Übersetzung

angenommene Motordrehzahl: $n_M := 5000 \text{ min}^{-1}$ $n_{Ms} := n_M$

Dimension Hinterrad: 130/80 ZR 16 (Annahme Kawasaki GPZ 900)

$$n_{Ms} = 83.333 \frac{1}{s}$$

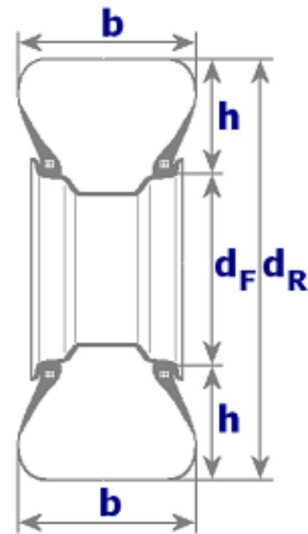
$$b_{\text{Reifen}} := 130 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Reifen}} := 80 \text{ mm}$$

$$d_{\text{Felge_in_Zoll}} := 16$$

$$f_{\text{Zoll_in_mm}} := 25.4 \text{ mm}$$

Rad durchmesser	Reifenhöhe			Folgendurchmesser Zoll -> mm
	oben unten	Reifen- breite	Verhältnis Höhe zu Breite	
d_R	$2 \cdot b$	b	$\frac{h/b}{100}$	$d_F \cdot 25,4$



$$d_{\text{Rad}} := 2 \cdot b_{\text{Reifen}} \cdot \frac{h_{\text{Reifen}}}{100} + d_{\text{Felge_in_Zoll}} \cdot f_{\text{Zoll_in_mm}}$$

$$d_{\text{Rad}} = 0.408 \text{ m}$$

angenommene Nenngeschwindigkeit: $v_n := 50 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$ $v_n = 13.889 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

angenommene Höchstgeschwindigkeit: $v_{\text{max}} := 120 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$ $v_{\text{max}} = 33.333 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Abrollumfang des Rades: $U_{\text{Rad}} := d_{\text{Rad}} \cdot \pi$ $U_{\text{Rad}} = 1.282 \text{ m}$

Drehzahl des Rades: $n_{\text{Rad}} := \frac{v_{\text{max}}}{U_{\text{Rad}}}$ $n_{\text{Rad}} = 1.56 \times 10^3 \frac{1}{\text{min}}$

optimale Übersetzung: $i_{\text{opt}} := \frac{n_M}{n_{\text{Rad}}}$

$$i_{\text{opt}} = 3.204$$

Berechnung der Fahrwiderstände

Berechnung des Rollwiderstandes:

Straßenbelag	μ_r
Asphalt, Beton	0,013
Pflaster	0,015
Schotter, gewalzt	0,020
Teermakadam	0,025
Erdweg	0,050

angenommener c_R Wert: $c_R := 0.013$

Maße des Fahrzeuges mit Fahrer und Beladung: $m_{\text{ges}} := 310\text{kg}$

$$F_r := m_{\text{ges}} \cdot g \cdot c_r$$

$$F_r = 39.521\text{N}$$

Berechnung des Luftwiderstandes:

$$\rho_{\text{Luft}} := 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Luftwiderstandsbeiwert angenommen: $c_w := 0.5$

$$A_{\text{Front}} := 0.8\text{m}^2$$

$$F_L := \frac{\rho_{\text{Luft}} \cdot c_w \cdot A_{\text{Front}} \cdot v_{\text{max}}^2}{2}$$

$$F_L = 287.333\text{N}$$

Berechnung des Steigungswiderstandes:

$$F_{\text{st}} := m_{\text{ges}} \cdot g \cdot 0.15$$

$$F_{\text{st}} = 456.009\text{N}$$

Berechnung des gesamten stationären Gesamtwiderstandes:

$$F_{\text{ges}} := F_{\text{r}} + F_{\text{L}} + F_{\text{st}}$$

$$F_{\text{ges}} = 782.863\text{N}$$

Berechnung des translatorischen Beschleunigungswiderstandes

festgelegte Beschleunigungszeit $\Delta t := 6\text{s}$

$$a_{\text{trans}} := \frac{v_{\text{n}}}{\Delta t}$$

$$a_{\text{trans}} = 2.315 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{\text{atrans}} := m_{\text{ges}} \cdot a_{\text{trans}}$$

$$F_{\text{atrans}} = 717.593\text{N}$$

Berechnung des Motor-Leistungsbedarfs

Berechnung des Gesamtwirkungsgrades

angenommene Wirkungsgrade

Motorwirkungsgrad: $\eta_{\text{M}} := 0.92$

Wirkungsgrad des Antriebsstranges: $\eta_{\text{AS}} := 0.92$

$$\eta_{\text{ges}} := \eta_{\text{M}} \cdot \eta_{\text{AS}}$$

$$\eta_{\text{ges}} = 0.856$$

Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände

$$P_{FW} := F_{ges} \cdot v_n$$

$$P_{FW} = 10.873 \text{ kW}$$

$$M_{FW} := \frac{P_{FW}}{2 \cdot \pi \cdot n_M}$$

$$M_{FW} = 20.766 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Benötigte Beschleunigungsleistung

Beschleunigung aus dem Stand

$$\Delta v_n := 50 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$P_B := F_{atrans} \cdot \Delta v_n$$

$$P_B = 9.967 \text{ kW}$$

$$M_B := \frac{P_B}{2 \cdot \pi \cdot n_M}$$

$$M_B = 19.035 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Bestimmung der Nennleistung und des Nennmoments

$$P_{nenn} := \frac{\max(P_{FW}, P_B)}{\eta_{ges}}$$

$$P_{nenn} = 12.708 \text{ kW}$$

$$M_{nenn} := \frac{\max(M_{FW}, M_B)}{\eta_{ges}}$$

$$M_{nenn} = 24.271 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Auslegung des Energiespeichers

maximale Reichweite:

$$s_{\max} := 35\text{km}$$

angenommene Nennspannung des Motors:

$$U_n := 73.6\text{V}$$

Geforderte Kapazität des Akkus:

$$K_n := \frac{P_{\text{nenn}} \cdot s_{\max}}{U_n \cdot v_n}$$

$$K_n = 120.866\text{A} \cdot \text{hr}$$

Berechnung des Maximalstromes:

$$I_{\max} := \frac{P_{\text{nenn}}}{U_n}$$

$$I_{\max} = 172.665\text{A}$$

Anlagen, Teil 2: Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl

Antriebsauslegung mit Motordaten und endgültiger Zellenanzahl:

Berechnung der Übersetzung

Motordrehzahl aus Spannungs-Drehzahl-tabelle: $n_M := 3520 \text{ min}^{-1}$

$$n_{Ms} := n_M$$

$$n_{Ms} = 58.667 \frac{1}{s}$$

Dimension Hinterrad: 160/60 ZR 18

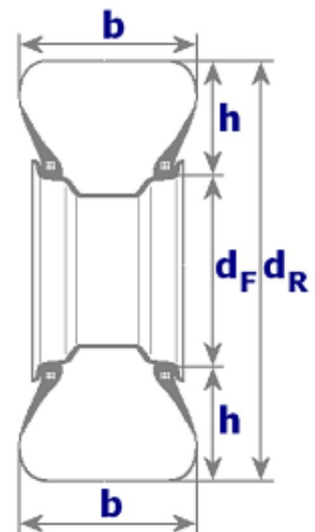
$$b_{\text{Reifen}} := 160 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Reifen}} := 60 \text{ mm}$$

$$d_{\text{Felge_in_Zoll}} := 18$$

$$f_{\text{Zoll_in_mm}} := 25.4 \text{ mm}$$

Rad durch- messer	Reifenhöhe			Folgendurchmesser Zoll -> mm
	oben unten	Reifen- breite	Verhältnis Höhe zu Breite	
d_R	$2 \cdot b$	b	$\frac{h/b}{100}$	$d_F \cdot 25,4$



$$d_{\text{Rad}} := 2 \cdot b_{\text{Reifen}} \cdot \frac{h_{\text{Reifen}}}{100} + d_{\text{Felge_in_Zoll}} \cdot f_{\text{Zoll_in_mm}}$$

$$d_{\text{Rad}} = 0.458 \text{ m}$$

angenommene Nenngeschwindigkeit:

$$v_n := 50 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$v_n = 13.889 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

angenommene Höchstgeschwindigkeit:

$$v_{\text{max}} := 120 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$v_{\text{max}} = 33.333 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Abrollumfang des Rades:

$$U_{\text{Rad}} := d_{\text{Rad}} \cdot \pi$$

$$U_{\text{Rad}} = 1.44 \text{ m}$$

Drehzahl des Rades:

$$n_{\text{Rad}} := \frac{v_{\text{max}}}{U_{\text{Rad}}}$$

$$n_{\text{Rad}} = 1.389 \times 10^3 \frac{1}{\text{min}}$$

optimale Übersetzung:

$$i_{\text{opt}} := \frac{n_M}{n_{\text{Rad}}}$$

$$i_{\text{opt}} = 2.535$$

Berechnung der Fahrwiderstände

Berechnung des Rollwiderstandes:

Straßenbelag	μ_r
Asphalt, Beton	0,013
Pflaster	0,015
Schotter, gewalzt	0,020
Teermakadam	0,025
Erdweg	0,050

angenommener cR Wert: $c_r := 0.013$

Maße des Fahrzeuges mit Fahrer und Beladung: $m_{\text{ges}} := 310\text{kg}$

$$F_r := m_{\text{ges}} \cdot g \cdot c_r$$

$$F_r = 39.521\text{N}$$

Berechnung des Luftwiderstandes:

$$\rho_{\text{Luft}} := 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Luftwiderstandsbeiwert angenommen: $c_w := 0.5$

$$A_{\text{Front}} := 0.8\text{m}^2$$

$$F_L := \frac{\rho_{\text{Luft}} \cdot c_w \cdot A_{\text{Front}} \cdot v_{\text{max}}^2}{2}$$

$$F_L = 287.333\text{N}$$

Berechnung des Steigungswiderstandes:

$$F_{\text{st}} := m_{\text{ges}} \cdot g \cdot 0.15$$

$$F_{\text{st}} = 456.009\text{N}$$

Berechnung des gesamten stationären Gesamtwiderstandes:

$$F_{\text{ges}} := F_{\text{r}} + F_{\text{L}} + F_{\text{st}}$$

$$F_{\text{ges}} = 782.863 \text{ N}$$

Berechnung des translatorischen Beschleunigungswiderstandes

festgelegte Beschleunigungszeit $\Delta t := 6 \text{ s}$

$$a_{\text{trans}} := \frac{v_{\text{n}}}{\Delta t}$$

$$a_{\text{trans}} = 2.315 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{\text{atrans}} := m_{\text{ges}} \cdot a_{\text{trans}}$$

$$F_{\text{atrans}} = 717.593 \text{ N}$$

Berechnung des Motor-Leistungsbedarfs

Berechnung des Gesamtwirkungsgrades

angenommene Wirkungsgrade

Motorwirkungsgrad: $\eta_{\text{M}} := 0.92$

Wirkungsgrad des Antriebsstranges: $\eta_{\text{AS}} := 0.92$

$$\eta_{\text{ges}} := \eta_{\text{M}} \cdot \eta_{\text{AS}}$$

$$\eta_{\text{ges}} = 0.856$$

Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände

$$P_{FW} := F_{ges} \cdot v_n$$

$$P_{FW} = 10.873 \text{ kW}$$

$$M_{FW} := \frac{P_{FW}}{2 \cdot \pi n_M}$$

$$M_{FW} = 29.497 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Benötigte Beschleunigungsleistung

Beschleunigung aus dem Stand

$$\Delta v_n := 50 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$P_B := F_{atrans} \cdot \Delta v_n$$

$$P_B = 9.967 \text{ kW}$$

$$M_B := \frac{P_B}{2 \cdot \pi n_M}$$

$$M_B = 27.038 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Bestimmung der Nennleistung und des Nennmoments

$$P_{nenn} := \frac{\max(P_{FW}, P_B)}{\eta_{ges}}$$

$$P_{nenn} = 12.708 \text{ kW}$$

$$M_{nenn} := \frac{\max(M_{FW}, M_B)}{\eta_{ges}}$$

$$M_{nenn} = 34.476 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Auslegung des Energiespeichers

maximale Reichweite:

$$s_{\max} := 35 \text{ km}$$

Zellen-Nennspannung für 23 Zellen:

$$U_n := 70.4 \text{ V}$$

Geforderte Kapazität des Akkus:

$$K_n := \frac{P_{\text{nenn}} \cdot s_{\max}}{U_n \cdot v_n}$$

$$K_n = 126.36 \text{ A} \cdot \text{hr}$$

Berechnung des Maximalstromes:

$$I_{\max} := \frac{P_{\text{nenn}}}{U_n}$$

$$I_{\max} = 180.514 \text{ A}$$

Berechnung der erreichbaren Reichweite mit 90Ah Zellen

$$K_{90} := 90 \text{ A} \cdot \text{hr}$$

maximal mögliche Reichweite mit 90 Ah Zellen:

$$s_{\text{moeglich}} := \frac{K_{90} \cdot U_n \cdot v_n}{P_{\text{nenn}}}$$

$$s_{\text{moeglich}} = 24.929 \text{ km}$$

Danksagung

Mein Dank an dieser Stelle gilt besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt der meine Diplomarbeit betreut hat und ohne dessen Hilfe diese Arbeit nicht zu Stande gekommen wäre. Er stand mir bei offenen Fragen immer zur Seite.

Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Frau Annemarie und meinen Kindern Hannah und Paul für ihre Geduld und ihre Unterstützung bedanken.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Altensam den 24.05.2017

Mario Schachermayr